

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Denis Matija**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Denis Matija

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentu mag. ing. Ivanu Juriću na pomoći kod izvedbe eksperimentalnog dijela rada, primjedbama i savjetima tijekom pisanja ovog rada i beskrajnom strpljenju i razumijevanju.

Hvala obitelji i Ani na ukazanom povjerenju i podršci tijekom studija jer bez njih ne bi bilo ovog rada i postignutog uspjeha. U svemu je potreban mali poticaj i ohrabrivanje u trenucima slabosti.

Denis Matija



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

**DENIS MATIJA**

Mat. br.: **0035182095**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**ANALIZA ZAOSTALIH NAPREZANJA PRI ZAVARIVANJU  
NELEGIRANIH ČELIKA PRIMJENOM PROGRAMA VISUAL  
WELD**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN WELDING OF  
UNALLOYED STEELS BY APPLICATION OF VISUAL WELD  
SOFTWARE**

Opis zadatka:

Istražiti mehanizme nastajanja zaostalih naprezanja i deformacija pri zavarivanju nelegiranih konstrukcijskih čelika. Opisati metode određivanja zaostalih naprezanja te analizirati moguću primjenu u realnim uvjetima. Posebno proučiti utjecaj geometrije žlijeba, unosa topline i redoslijeda zavarivanja na pojavu deformacija i zaostalih naprezanja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za odgovarajuću debljinu materijala za sučeljeni ili kutni spoj čelika kvalitete S355 odrediti tehnologiju zavarivanja MAG postupkom. Načiniti komparativnu analizu sa primjenom više različitih priprema zavara i razina unosa topline. Pomoću programske aplikacije Visual Weld 11.0 replicirati istovjetne situaciju i usporediti stvarne deformacije sa rješenjima dobivenim primjenom programa. Usporediti rezultate i analizirati eventualna odstupanja te donijeti zaključke o primjenjivosti programske aplikacije Visual Weld 11.0 za realne proizvode.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

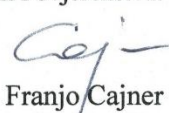
Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zdao:

  
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. NAPREZANJA U MATERIJALU .....	3
3. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	7
3.1. Deformacije uslijed zavarivanja.....	11
3.2. Podjela zaostalih naprezanja .....	12
3.3. Nastanak zaostalih naprezanja .....	14
3.4. Posljedice zaostalih naprezanja i deformacija .....	17
3.5. Mjere za smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija.....	18
4. MJERENJE ZAOSTALIH NAPREZANJA .....	24
5. NUMERIČKE SIMULACIJE KOD ZAVARIVANJA .....	28
5.1. SORPAS (2D i 3D).....	29
5.2. Simufact.welding .....	30
5.3. Sysweld (Visual Weld 11.0, Visual Environment) .....	31
6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	33
6.1. Opis eksperimenta.....	33
6.2. Oprema za zavarivanje.....	34
6.2.1. Izvor struje .....	34
6.2.2. Automat za zavarivanje.....	35
6.3. Dodatni materijal i plin .....	35
6.4. Osnovni materijal.....	36
6.5. Ploče za zavarivanje.....	37
6.6. Parametri zavarivanja.....	40

---

6.7. Izrada ispitnih uzoraka .....	44
6.8. Simulacija u Visual Weld-u .....	47
6.8.1. Uzorak 1 .....	49
6.8.2. Uzorak 2 .....	51
6.8.3. Uzorak 3 .....	54
6.8.4. Uzorak 4 .....	55
6.9. Analiza rezultata .....	58
7. ZAKLJUČAK .....	60
8. LITERATURA .....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1. Dio tijela pod djelovanjem sila .....	3
Slika 2. Model naprezanja .....	4
Slika 3. Konvencionalni dijagram rastezanja .....	5
Slika 4. Naprezanje u zoni zavora: a) Toplinsko naprezanje tijekom zavarivanja; b) Longitudinalno zaostalo naprezanje nakon hlađenja .....	7
Slika 5. Pojednostavljeni model nastanka zaostalih naprezanja .....	8
Slika 6. Shematski prikaz naprezanja u zavaru .....	10
Slika 7. Raspored naprezanja u zavaru .....	10
Slika 8. Tipične deformacije uslijed zavarivanja .....	12
Slika 9. Prvi, drugi i treći red zaostalih naprezanja .....	13
Slika 10. Krivulje hlađenja i toplinska naprezanja za čelični valjak hlađen u vodi s 850 °C ..	15
Slika 11. Pojava zaostalih naprezanja kao posljedica različitih koeficijenata toplinske dilatacije .....	16
Slika 12. Veličina kutne deformacije u zavisnosti o broju prolaza .....	18
Slika 13. Primjena steznih naprava .....	19
Slika 14. Prednaprezanje cijevi .....	19
Slika 15. Prednamještanje radnog komada .....	20
Slika 16. Razlika u naprezanjima kod različitih sljedova zavarivanja .....	21
Slika 17. Predgrijavanje zavarenog spoja .....	22
Slika 18. Mehanizam apsorpcije vodika .....	23
Slika 19. Oprema za bušenje .....	25
Slika 20. Shematski prikaz mjerenja metodom bušenja otvora .....	25
Slika 21. Difrakcija x-zrake .....	26
Slika 22. Shematski prikaz ultrazvučne metode .....	27
Slika 23. Radno sučelje SORPAS softvera .....	29
Slika 24. Simulacija EO zavarivanja u SORPAS-u .....	30
Slika 25. Sučelje Simufact.welding-a .....	31
Slika 26. Analiza rezultata deformacija .....	32
Slika 27. Izvor struje .....	34
Slika 28. Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002 .....	35

Slika 29. Priprema spoja od 60° .....	37
Slika 30. Priprema spoja od 40° .....	37
Slika 31. Pripojene ploče.....	38
Slika 32. Keramička podloška.....	39
Slika 33. Pripremljene ploče za zavarivanje .....	40
Slika 34. Zavarivanje uzoraka.....	42
Slika 35. Izgled drugog prolaza na uzorku 3.....	43
Slika 36. Izgled trećeg prolaza na uzorku 3 .....	43
Slika 37. Označavanje ploče za izrezivanje uzoraka.....	44
Slika 38. Izrezivanje uzoraka plinski i tračnom pilom.....	45
Slika 39. Uzorci nakon grube obrade .....	45
Slika 40. Uzorak 1 nakon nagrivanja .....	46
Slika 41. Uzorak 2 nakon nagrivanja .....	46
Slika 42. Uzorak 3 nakon nagrivanja .....	46
Slika 43. Uzorak 4 nakon nagrivanja .....	47
Slika 44. Pripremljen model 2 za simuliranje .....	48
Slika 45. Kalibracija unosa topline za uzorak 1 .....	50
Slika 46. Mehanička analiza uzorka 1 .....	50
Slika 47. Uvećana deformacija uzorka 1 za 10 puta .....	51
Slika 48. Uzorak 2 prije simulacije zavarivanja.....	52
Slika 49. Uzorak 2 nakon simulacije zavarivanja .....	52
Slika 50. Kalibracija unosa topline za uzorak 2 .....	53
Slika 51. Mehanička analiza uzorka 2.....	53
Slika 52. Kalibracija unosa topline za uzorak 3 .....	54
Slika 53. Mehanička analiza uzorka 3.....	55
Slika 54. Kalibracija unosa topline za uzorak 4 .....	56
Slika 55. Mehanička analiza uzorka 4.....	57
Slika 56. Deformacija uzorka 4 uvećana za 10 puta .....	57
Slika 57. Usporedba deformacija uzoraka.....	59



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala .....	36
Tablica 2. Stanja pokusa.....	38
Tablica 3. Parametri zavarivanja .....	41
Tablica 4. Izmjerene kutne deformacije .....	47

**POPIS KRATICA**

Kratika	Opis
MAG	Metal Active Gas
ZUT	Zona utjecaja topline
LTT	Low Transformation Temperature Alloy
HRN	HRvatska Norma
MKE	Metoda Konačnih Elemenata
CET	Carbon Equivalent

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$M_s$	Temperatura početka pretvorbe austenita u martenzit	$^{\circ}\text{C}$
$F_i$	Vanjske sile	N
$\Delta A_i$	Niz elementarnih površina	$\text{mm}^2$
$\sigma$	Normalno naprezanje	$\text{N/mm}^2$
$\tau$	Tangencijalno naprezanje	$\text{N/mm}^2$
$E$	Modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_p$	Granica proporcionalnosti (razvlačenja)	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_E$	Granica elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_T$	Granica razvlačenja	$\text{N/mm}^2$
$\varepsilon$	Ukupna deformacija	mm
$\varepsilon_{el}$	Elastična deformacija	mm
$\varepsilon_{pl}$	Plastična deformacija	mm
$R_m$	Vlačna čvrstoća	$\text{N/mm}^2$
$R_e$	Granica tečenja	$\text{N/mm}^2$
$T$	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$A_5$	Istezljivost	%
$KV$	Udarni rad loma	J
$Q$	Unos topline	$\text{kJ/cm}$
$I$	Struja	A
$U$	Napon	V
$v_{zav}$	Brzina zavarivanja	$\text{cm/min}$
$\beta$	Kut pripreme	$^{\circ}$
$\alpha$	Kutna deformacija	$^{\circ}$

## **SAŽETAK**

Zadatak ovog diplomskog rada je analizirati zaostala naprezanja i deformacije pri zavarivanju. U teorijskom dijelu opisani su mehanizmi nastajanja zaostalih naprezanja i deformacija tijekom zavarivanja, opisane su metode određivanja zaostalih naprezanja te utjecaj pripreme spoja, unosa topline i redoslijeda zavarivanja na pojavu deformacija i zaostalih naprezanja.

U eksperimentalnom dijelu doneseni su rezultati deformacija na temelju zavarivanja dviju ploča čelika kvalitete S355 sa MAG postupkom. U eksperimentu su se kombinirale dvije različite V pripreme spoja i razine unosa topline.

Cilj eksperimenta bila je usporedba dobivenih rezultata iz programske aplikacije Visual Weld i zavarivanja u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Ključne riječi:

Čelik S355, Visual Weld, zaostala naprezanja, deformacije, zavarivanje MAG postupkom

## **SUMMARY**

The task of this diploma work is to analyze the residual stresses and strains in welding.

The theoretical part describes the mechanisms of formation of residual stress and deformation during welding, describes the methods of determining the residual stress and the effect of the preparation circuit, heat input, and the order of the occurrence of welding deformation and residual stresses.

In the experimental part adopted the results of deformation on the basis of welding two plates steel grade S355 the MAG procedure. In an experiment combining the different dimensions in the preparation and the level of heat generation. The goal of the experiment is to compare the results obtained from the software Visual Weld and weld in a laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Key words:

Steel S355, Visual Weld, residual stresses, deformations, MAG welding process

## 1. UVOD

Čelične konstrukcije najčešće su izrađene spajanjem više pojedinačnih dijelova. Način spajanja cjelokupne konstrukcije određen je tehnologijom, gdje razlikujemo rastavljive i nerastavljive spojeve. U ovom radu obradit će se nerastavljivi spojevi, točnije zavareni spojevi.

Zavarivanje je na samom vrhu kad je u pitanju spajanje. Zavareni spojevi mogu biti izvedeni na kvalitetan i manje kvalitetan način, a za provjeru toga služe različita ispitivanja i kontrole. Na kvalitetu zavarenog spoja utječe toplinska obrada provedena prije, tijekom ili nakon zavarivanja. U današnje vrijeme, uz visoku tehnologiju, svako oblikovanje ili spajanje nekih materijala, bilo metalnih ili nemetalnih, i izradbe gotovih proizvoda (automobili, kotlovi, mostovi, cjevovodi, zrakoplovi, razne nosive konstrukcije), mora biti izvedeno s minimalnim naprezanjima spoja i dijela konstrukcije. Kao sve ostale vrste spajanja materijala, i zavarivanje ima svoje ciljeve, a to su sigurnost zavarenih spojeva, minimizirani troškovi u pogledu osnovnog i dodatnog materijala kao i minimalan utrošak energije. Također, potrebno je voditi brigu o čistoći i sigurnosti čovjekove okoline.

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala u cilju dobivanja homogenog spoja zadovoljavajuće kvalitete. To dakako podrazumijeva i određeni unos topline u materijal, tj. zavareni spoj. Osnovni materijal koji se nalazi neposredno uz metal zavora, za vrijeme zavarivanja zagrijava se približno do temperature taljenja. Temperatura osnovnog materijala udaljenog od metala zavora značajno je niža. Lokalno zagrijavanje i hlađenje materijala uzrokuje naprezanja u metalu zavora, zoni utjecaja topline (ZUT) i ostatku konstrukcije. Naprezanja u materijalu mogu doseći granicu razvlačenja te tako omogućavaju pojavu zamora materijala i loma.

Zaostala naprezanja u zavarivanju imaju veliku ulogu. U svrhu smanjenja koriste se prilagođeni materijali, npr. čelika povišene čvrstoće, i zahtijeva se maksimalna iskorištenost svojstava materijala. Posljedice zaostalih naprezanja treba uzeti u obzir još u fazi konstruiranja. Uporaba legura niskotemperaturnih transformacija (Low Transformation Temperature) je dobar pristup za kontrolu naprezanja već tijekom procesa zavarivanja jer se njihovom primjenom izbjegava dugotrajna naknadna toplinska obrada. Legure niskotemperaturne transformacije (LTT) prvi put se pojavljuju u izvješćima japanskih znanstvenika.

LTT legure su visokolegirani dodatni materijali čija je temperatura početka stvaranja martenzitne faze ( $M_s$ ) malo viša od sobne temperature.

Ta niskotemperaturna fazna transformacija omogućuje regulaciju i umanjuje zaostalih naprezanja u metalu zavora i zoni utjecaja topline (ZUT) za razliku od zavarivanja s dodatnim materijalima od niskolegiranih čelika čija je temperatura martenzitne transformacije značajno viša. To znači da LTT legure nisu nužno određene sa  $M_s$  temperaturom, kemijskim sastavom ili strukturom [1]. Naime, ovim se legurama kontroliraju zaostala naprezanja preko faznih promjena. Uobičajene  $M_s$  temperature kreću se između 150 °C i 250 °C.

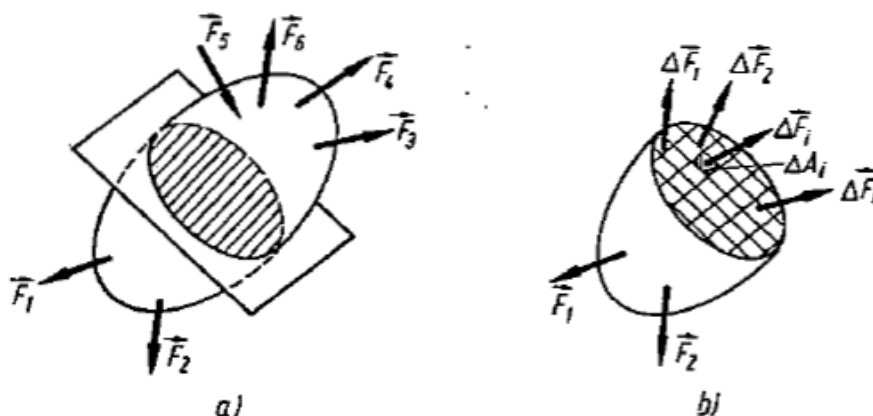
Ove legure predstavljaju novu generaciju dodatnih materijala. Ipak, LTT legure još su uvijek u fazi razvoja.

## 2. NAPREZANJA U MATERIJALU

Djelovanje vanjskih sila i momenata na neko tijelo predstavlja opterećenje tog dijela. Opterećenje može biti silama (normalnim i tangencijalnim) te momentima savijanja i uvijanja izazvanim djelovanjem odgovarajućih sila. Obzirom na smjer djelovanja vanjskih sila razlikujemo opterećenje na vlak, tlak, smicanje, savijanje i uvijanje.

Kod toplinskih i zaostalih naprezanja govorimo o trajnim opterećenjima i trajnim deformacijama, dok kod trenutačnih i povremenih naprezanja govorimo o elastičnim deformacijama.

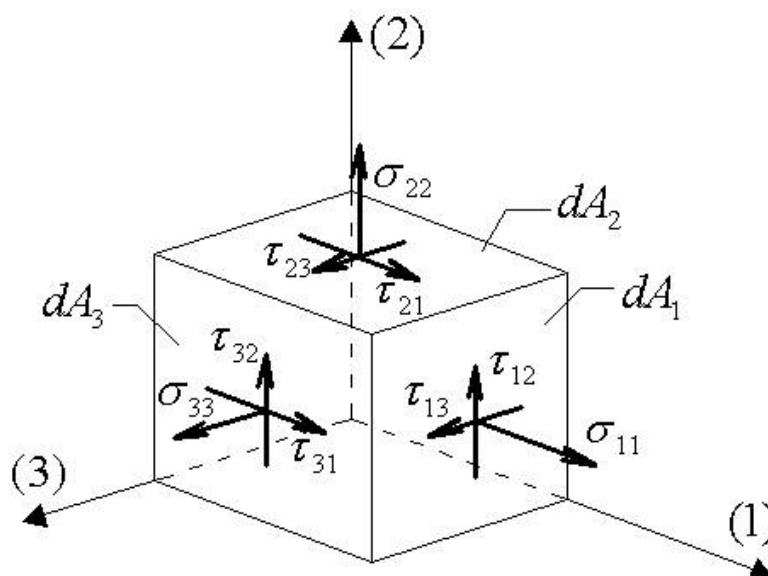
Vanjske sile koje djeluju na čvrsto tijelo nastoje razdvojiti ili približiti pojedine čestice tijela, pri čemu dolazi do promjene oblika, tj. tijelo se deformira, pri čemu se unutar njegove strukture pojavljuju unutarnje sile koje nastoje spriječiti deformaciju. Na slici 1.a) prikazano je neko tijelo na kojeg djeluju vanjske sile  $F_i$ . Kao što je prikazano na Slika 1., zbog jednostavnosti, ravnom površinom presječeno je na dva dijela. Ako je tijelo bilo u ravnoteži pod djelovanjem vanjskih sila, bit će i svaki dio tijela u ravnoteži. Površina presjeka podijeli se na niz elementarnih površina  $\Delta A_i$  kako je prikazano na slici 1 b) [2].



Slika 1. Dio tijela pod djelovanjem sila [2]

Analizom napregnutog tijela izdvaja se infinitezimalni dio, prikazan na slici 2. Radi jednostavnosti, a i jednoobraznosti, uvodi se desni koordinatni sustav  $O_{x_1, x_2, x_3}$  čije su stranice paralelne s koordinatnim ravninama i čime izbjegavamo negativne površine. Svaka površina označena je normalnim ( $\sigma$ ) i tangencijalnim ( $\tau$ ) naprezanjima.





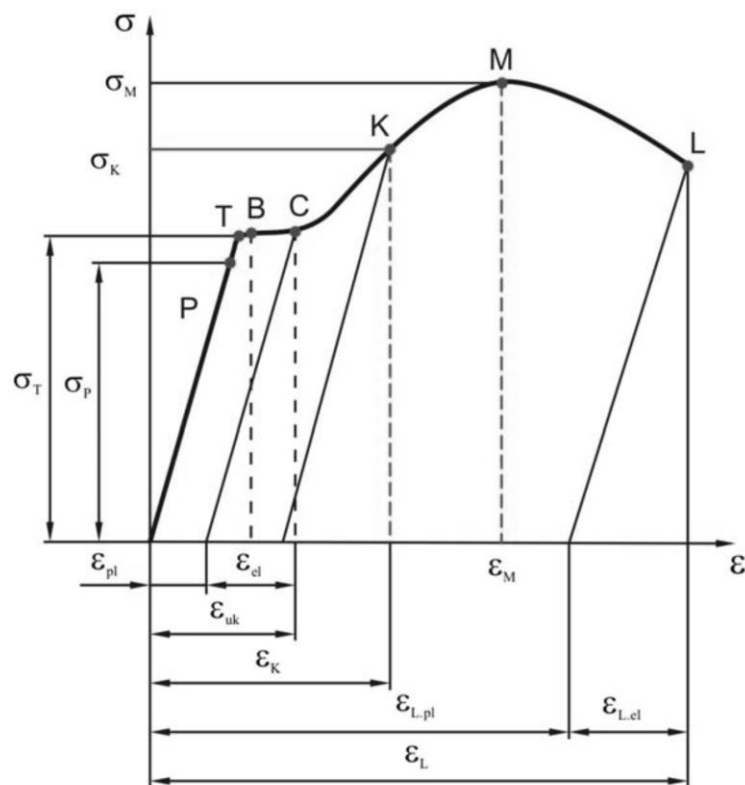
Slika 2. Model naprezanja [3]

Sve komponente jednostavno se mogu označiti kao  $\sigma_{ij}$  i upisati u matricu:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ukupno stanje naprezanja u jednoj točki napregnutog tijela opisuje 9 komponentata. Takav skup komponentata predstavlja tenzor drugog reda jer se svaka od komponentata definira s dvije oznake (indeksa) [3].

Mehanička svojstva materijala opisuju se pomoću  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama (Slika 3). Dijagram prikazuje ovisnost naprezanja  $\sigma$  i istezanja za ispitni materijal (epruvete) kroz tri stanja. Prvo stanje je elastično gdje se materijal nakon rasterećenja vraća u prvobitno stanje, dok se u drugom stanju plastično deformira, tj. trajno ostaje u promijenjenom položaju. U trećem stanju naprezanje prelazi maksimalnu vrijednost te dolazi do loma materijala.



**Slika 3. Konvencionalni dijagram rastezanja [4]**

Dijagram počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem i za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2)$$

Što je modul elastičnosti  $E$  veći, za isto istezanje  $\epsilon$  bit će potrebno veće naprežanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeovog pravca bit će strmiji. Svako naprežanje u području u kojem vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju (istezanje), pa nakon rasterećenja deformacija iščezava. Hookeov pravac je s gornje strane ograničen granicom proporcionalnosti  $\sigma_P$  do koje vrijedi linearni odnos naprežanja i deformacija. Ako je  $\sigma \leq \sigma_P$ , vrijedi Hookeov zakon. Malo iznad nje nalazi se granica elastičnosti  $\sigma_E$  i predstavlja najviše naprežanje do kojeg se materijal ponaša elastično. Ako je  $\sigma \leq \sigma_E$ , nakon rasterećenja mjerni dio epruvete potpuno se vraća u prvobitni oblik i veličinu.

Granica razvlačenja  $\sigma_T$  je ono naprezanje kod kojeg se epruveta počinje produljivati bez povećanja naprezanja. Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti, gornja i donja granica razvlačenja, pa se često taj dio prikazuje kao ploha tečenja (B-C). Rasterećenjem iz toga područja zaostaju u materijalu i trajne plastične deformacije  $\varepsilon_{pl}$ . Ukupna deformacija jednaka je sumi elastične deformacije i plastične deformacije, prema (3):

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

Kod materijala koji imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija, utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja. To je ono naprezanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju. Kod konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,01}$ , u materijalu nakon rasterećenja ostaje plastična deformacija od 0,01 %, dok je kod konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  plastična deformacija 0,2 %. Područje C – M je područje očvršćenja materijala, povećanjem sile opterećenja, raste i naprezanje  $\sigma$  i deformacija  $\varepsilon$ .

Rasterećenje iz neke točke K odvija se po pravcu jer u procesu rasterećenja vrijedi uvijek Hookeov zakon, što znači da je veza između smanjenja naprezanja i smanjenja deformacija linearna. Deformacija  $\varepsilon_{rast}$  pokazuje smanjenje deformacija, ali samo elastičnih  $\sigma_{rast}$ :

$$\sigma_{rast} = E \cdot \varepsilon_{rast} \quad (4)$$

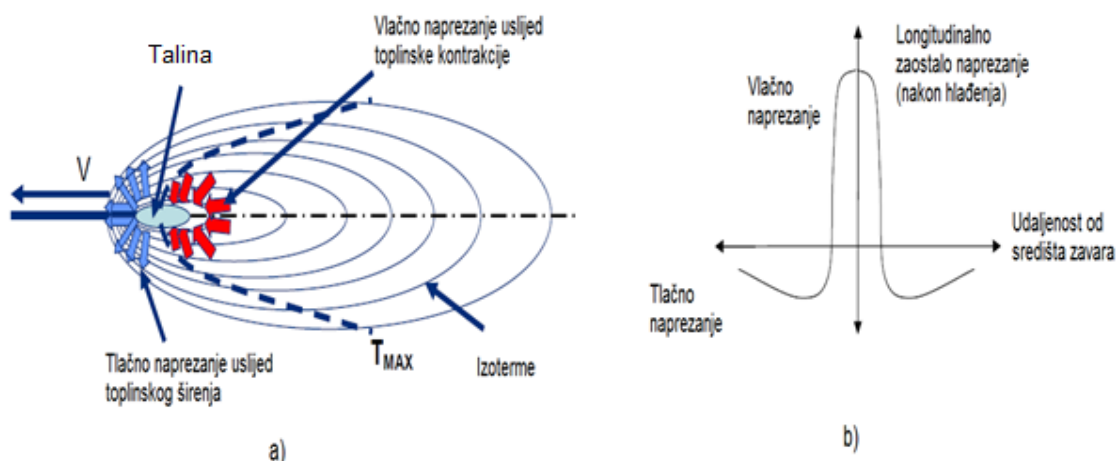
Naprezanje pri maksimalnoj sili naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$ . Vlačna čvrstoća nije maksimalno naprezanje, već naprezanje pri maksimalnoj sili jer ploština presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje se naglo smanjivati, pa stvarno naprezanje, unatoč smanjenju sile, raste. Vlačna čvrstoća osnovno je mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema svojoj mehaničkoj otpornosti.

### 3. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Problem naprezanja i deformacija kod zavarivanja nastaju gotovo istodobno s uvođenjem zavarivanja kao metode spajanja. 1892. godine Slavianov u svojim djelima spominje "štetna naprezanja u metalu" koja se pojavljuju tijekom zavarivanja. Unatoč značajnom razvoju tehnologije zavarivanja od tog vremena, taj problem je i dalje prisutan [5].

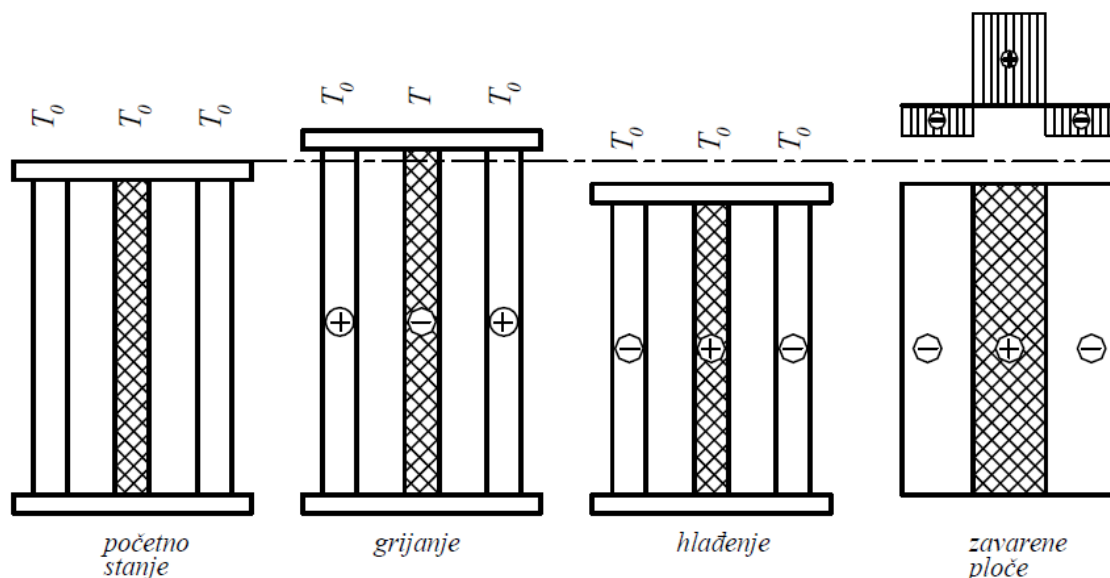
Zaostala naprezanja su makro i mikro naprezanja prisutna u predmetu (izratku, strojnom dijelu, itd.) bez djelovanja vanjskih sila i momenata u tom trenutku, a nalaze se u mehaničkoj ravnoteži. Zaostala naprezanja kao pojava uočena su još davno kod prirodnih materijala (kamen, drvo), a tek kasnije kod metalnih materijala [6].

Procesom zavarivanja u materijal se unose neželjena naprezanja, a ponekad se javljaju i deformacije. To se događa zbog unosa energije u materijal, taljenja i solidifikacije metala. U okruženju zavarenog spoja tijekom solidifikacije zavora javljaju se vlačna zaostala naprezanja, posebice u longitudinalnom pravcu što je prikazano na slici 4 a). Ta naprezanja utječu na dinamičku čvrstoću i žilavost, posebice ako postoje određena zarezna djelovanja ili nedostaci u području zavora. Nakon zavarivanja zaostala vlačna naprezanja ostaju preko središta zavora i uzrokuju balansiranje tlačnih naprezanja van zone zavarivanja kao što je prikazano na slici 4 b).



**Slika 4. Naprezanje u zoni zavora: a) Toplinsko naprezanje tijekom zavarivanja; b) Longitudinalno zaostalo naprezanje nakon hlađenja [7]**

Nastanak zaostalih naprezanja moguće je objasniti jednostavnim modelom (Slika 5) koji se sastoji od tri jednaka štapa koji su na krajevima nepomično učvršćeni krutim pločama. Pritom se gornja kruta ploča može pomicati u osnom smjeru štapova [5].



**Slika 5. Pojednostavljeni model nastanka zaostalih naprezanja [5]**

U početnom stanju temperatura sva tri štapa je jednaka i iznosi  $T_0$ . U slučaju da se srednji štap zagrije na temperaturu  $T > T_0$ , doći će do produljenja sva tri štapa pri čemu će zbog produljenja bočni štapovi biti opterećeni na vlak. Srednji štap zbog porasta temperature ima tendenciju produljenja, ali zbog ukruta na krajevima štapa to produljenje se ne može ostvariti u potpunosti pa srednji štap postaje tlačno opterećen. Ukoliko se temperatura  $T$  drži dovoljno niskom da naprezanja u srednjem štapu ostanu ispod granice razvlačenja materijala, nakon hlađenja na početnu temperaturu  $T_0$ , naprezanja u sva tri štapa će biti jednaka nuli. U slučaju da se srednji štap zagrije na temperaturu dovoljno veliku da tlačna naprezanja premaše granicu razvlačenja materijala, nakon hlađenja srednjeg štapa na početnu temperaturu u njemu ostaju trajne plastične deformacije. U fazi hlađenja srednji štap nastoji smanjiti svoju duljinu čemu se opiru bočni štapovi pa srednji štap biva opterećen na vlak. Istovremeno skupljanje srednjeg štapa izaziva tlačno naprezanje u bočnim štapovima. Analogiju štapnom modelu moguće je pronaći u sučeljeno zavarenim pločama pri čemu zavar igra ulogu srednjeg štapa, a područja podalje od zavara analogna su bočnim štapovima prikazanog modela. Dijagram koji prikazuje zaostala naprezanja u zavarenim pločama na slici 5 krajnje je pojednostavljen.

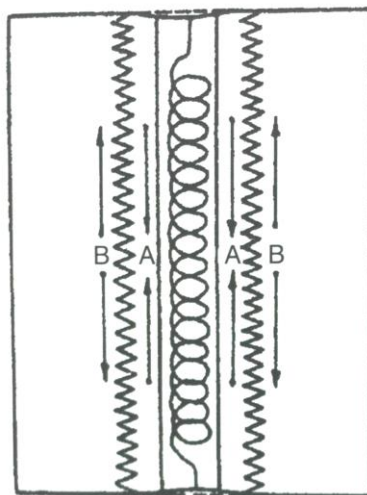
Stvarno stanje zaostalih naprezanja znatno je složenije i ovisi o mnogim faktorima kao što su:

- količina unesene topline zavarivanjem
- broj prolaza pri zavarivanju
- redoslijed zavarivanja
- svojstva osnovnog materijala i materijala popune
- toplinski rubni uvjeti
- mehanički rubni uvjeti
- volumen rastaljenog metala
- dimenzije i oblik konstrukcije i sl. [5]

Odnos zaostalih naprezanja i deformacija u materijalu ovisi o rasporedu skupljanja zavora (simetrični ili nesimetrično), debljini materijala i krutosti konstrukcije. Naime, ukoliko su skupljanja raspoređena simetrično ili je materijal velike debljine ili je konstrukcija vrlo kruta, zaostala naprezanja bit će veća, a deformacije manje. U suprotnom slučaju (manje debljine, nesimetrično skupljanje metala) zaostala naprezanja bit će manja, ali će deformacije biti veće. Dakle, zaostalim napreznjima smatraju se unutarnja naprezanja (prisilno nastala) u zavarenim konstrukcijama te se nalaze u ravnoteži sama sa sobom. Kao što je prije rečeno, uzročnik njihovog nastanka su neravnomjerni ciklusi zagrijavanja i hlađenja. Zaostala naprezanja se zapravo sastoje od toplinskih i strukturnih naprezanja [8]:

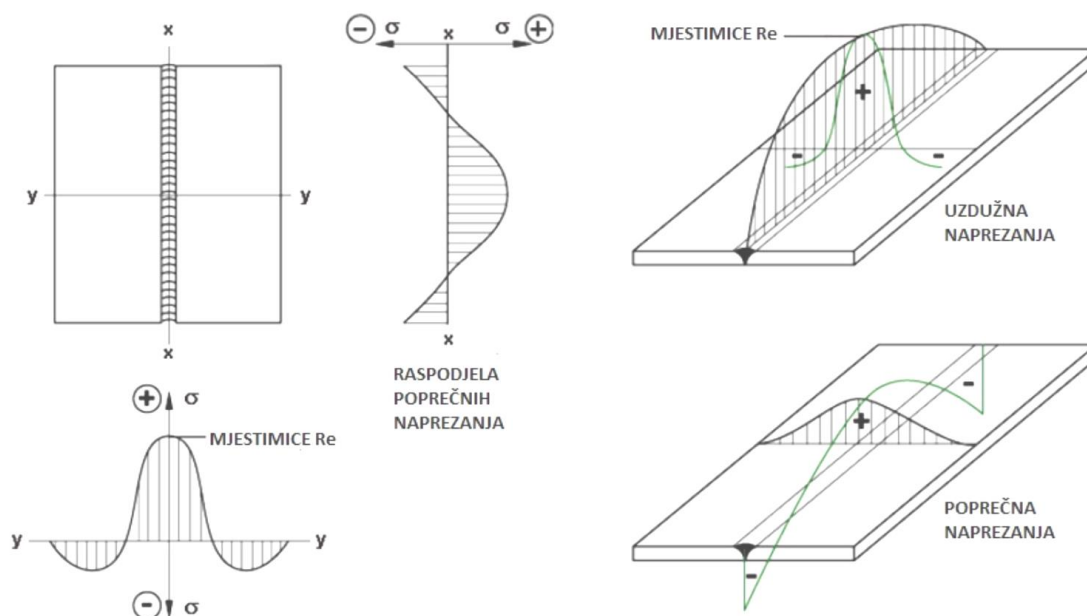
- **TOPLINSKA NAPREZANJA** – u području zavarenog spoja dolazi do neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja na sobnu temperaturu, te tako u tom području dolazi do nastanka različitih onemogućenih rastezanja i stezanja, čija su posljedica u konačnici toplinska naprezanja (mogu se popustiti razrezivanjem).
- **STRUKTURNA NAPREZANJA** – iz razloga što se proces hlađenja odvija vremenski i mjestimice vrlo različito dolazi do različitih promjena strukture te one uzrokuju povećanje volumena, a posljedica je pojava strukturnih naprezanja (u pravilu se ne mogu popustiti razrezivanjem).

Slika 6 prikazuje pojednostavljeni prikaz naprezanja u zavaru nakon hlađenja. Metal zavora se pokušava skupiti i djeluje kao napeta opruga, dok se okolni materijal tome opire stezanju poput stlačene opruge.



**Slika 6. Shematski prikaz naprezanja u zavaru [9]**

Na slici 7 prikazan je tijek naprezanja u jednostrano zavarenom sučeljenom spoju. Limovi su bili slobodni čime je zajamčeno slobodno stezanje. Zavarivano je u jednom smjeru od jednog do drugog ruba lima.



**Slika 7. Raspored naprezanja u zavaru [8]**

### 3.1. Deformacije uslijed zavarivanja

Deformacije kod zavarivanja predstavljaju odstupanja konstrukcijskog elementa od definiranog oblika nakon unošenja topline te potom hlađenja na sobnu temperaturu [8].

Zaostala naprezanja uslijed zavarivanja uzrokuju deformacije u konstrukciji koje, kao i kod zaostalih naprezanja, mogu biti trajnog ili privremenog karaktera. Ukupna deformacija u materijalu zavarene konstrukcije može se izraziti kao:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\Delta V} + \varepsilon_{Trp} \quad (5)$$

gdje su:

$\varepsilon_{el}$  – elastična deformacija

$\varepsilon_{pl}$  – plastična deformacija

$\varepsilon_{th}$  – toplinska deformacija

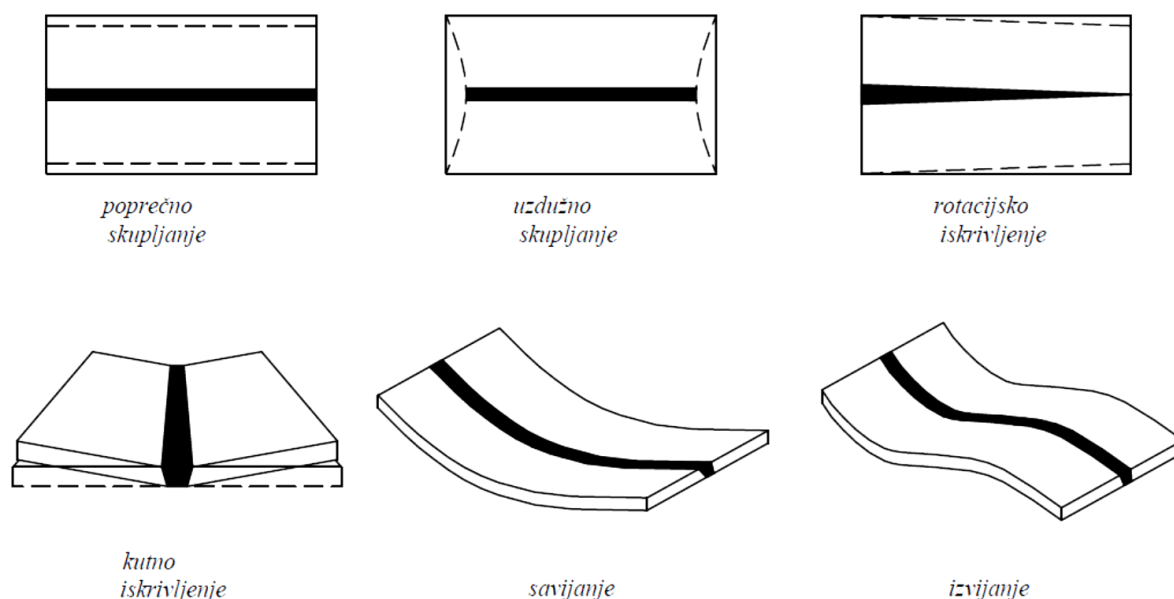
$\varepsilon_{\Delta V}$  – volumenska deformacija uslijed faznih promjena materijala

$\varepsilon_{Trp}$  – plastična deformacija uslijed faznih promjena materijala.

Kod zavarenih spojeva najčešće nalazimo šest tipičnih vrsta deformacija (vidi sliku 8):

- uzdužna deformacija – skraćenje elemenata u uzdužnom smjeru
- poprečna deformacija – skraćenje elemenata poprečno na uzdužnu os
- rotacijska deformacija – kutno iskrivljenje u ravnini ploče zbog toplinske ekspanzije ili kontrakcije
- kutna deformacija – iskrivljenje uzrokovano nejednolikom raspodjelom temperature u poprečnom smjeru
- savijanje – iskrivljenje u ravnini dužine zavora
- izvijanje – iskrivljenje uzrokovano tlačnim naprezanjima zbog nestabilnosti jer su ploče tanke [5].



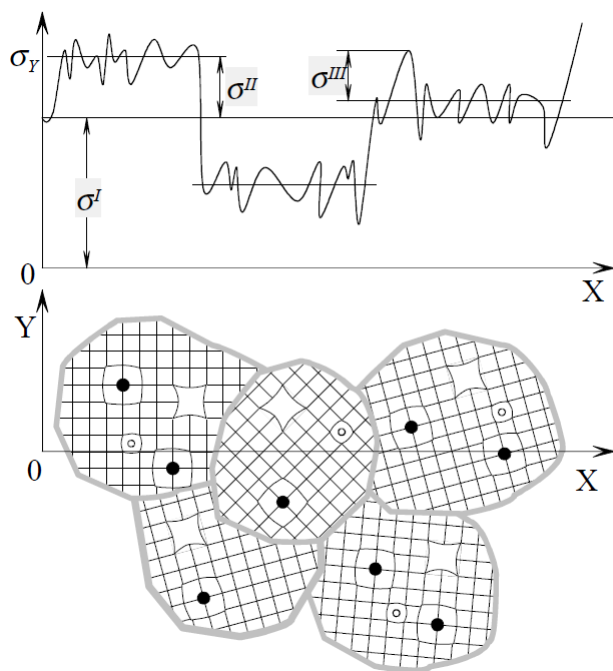


**Slika 8. Tipične deformacije uslijed zavarivanja [10]**

### 3.2. Podjela zaostalih naprezanja

Nakon prvotne podjele zaostalih naprezanja na mikro i makro zaostala naprezanja, ustalila se podjela na zaostala naprezanja prvog, drugog i trećeg reda (vrste) (Slika 9).

Zaostala naprezanja prvog reda  $\sigma^I$  prisutna su u većem području predmeta, odnosno protežu se preko većeg broja kristalnih zrna. Pripadajuće sile odnosno momenti nalaze se u ravnoteži u čitavom predmetu. Zaostala naprezanja prvog reda nazivaju se i makro zaostalim napreznjima.  $\sigma^{II}$  su zaostala naprezanja drugog reda i imaju konstantan iznos unutar jednog ili nekoliko kristalnih zrna (Slika 9). U ravnoteži se nalaze sile odnosno momenti manjeg broja susjednih zrna. Poremećajem ravnoteže sila ili momenata mogu se pojaviti makroskopske promjene dimenzija. Zaostala naprezanja drugog reda pripadaju skupini mikro zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja trećeg reda  $\sigma^{III}$  razlikuju se već na nekoliko atomskih razmaka u kristalnoj rešetki, a odgovarajuće sile odnosno momenti nalaze se u ravnoteži samo unutar djelića kristalnog zrna. Narušavanjem ravnoteže sila i momenata u ovom slučaju ne mogu nastupiti makroskopske promjene dimenzija predmeta. Zaostala naprezanja trećeg reda nazivaju se i mikro zaostalim napreznjima [5].



**Slika 9. Prvi, drugi i treći red zaostalih napreznja [5]**

Zaostala napreznja prisutna u nekom predmetu rezultat su superponiranja zaostalih napreznja prvog, drugog i trećeg reda:

$$\sigma = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (6)$$

Unutarnja napreznja su uravnotežena. Neovisno o raspodjeli napreznja u materijalu, napreznja u bilo kojem poprečnom presjeku moraju biti uravnotežena, suma sila i momenata jednaka je nuli. Točnije, u bilo kojoj ravnini okomitoj na x-os treba biti:

$$\int_A \sigma_x \cdot dA = 0 \quad \int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA = 0 \quad \int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA = 0 \quad (7)$$

Gdje je  $\sigma_x$  normalno napreznje u točki s koordinatama (y, z) u poprečnom presjeku A.

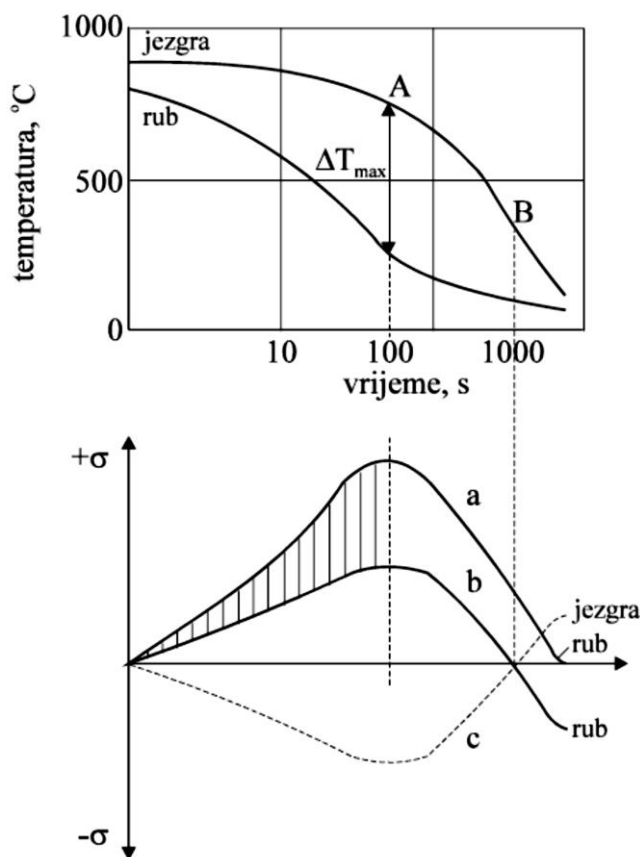
### 3.3. Nastanak zaostalih naprezanja

Kao što je poznato svaki metal se prilikom zagrijavanja širi u svim smjerovima, a hlađenjem dolazi ponovno do njegovog skupljanja. Ukoliko bi neki komad metala bio slobodan i ravnomjerno se zagrijavao, širio bi se bez ograničenja i ponovnim ravnomjernim hlađenjem skupio bi se, tj. vratio na početne dimenzije što bi značilo da se zaostala naprezanja i deformacije ne javljaju. Međutim zavarivanje se u odnosu na prethodno opisan postupak razlikuje u sljedećim točkama [8]:

1. zagrijavanje i hlađenje odvija se neravnomjerno
2. širenje zagrijanog materijala onemogućava okolni hladniji materijal
3. skupljanje zagrijanog dijela također onemogućava okolni hladniji materijal
4. različita kemijska, fizikalna i mehanička svojstva materijala i različite debljine radnih komada zahtijevaju različite unose toplina
5. različiti postupci zavarivanja imaju različite unose topline, a time i različite tijekove izoterma.

Zaostala naprezanja uvjetovana materijalom su mikro zaostala naprezanja (pretežno  $\sigma^{\text{III}}$ ), dok su zaostala naprezanja nastala tijekom izradbe ili uporabe gotovo uvijek makro zaostala naprezanja  $\sigma^{\text{I}}$  (eventualno  $\sigma^{\text{II}}$ ).

Za primjer nastanka zaostalih naprezanja prvog reda ( $\sigma^{\text{I}}$ ) najčešće se navode toplinska zaostala naprezanja (lijevanje, toplinska obrada). Na primjeru hlađenja (gašenja) čeličnog valjka Ø 100 mm razmotrit će se naprezanje prvog reda. Ovaj valjak gasi se u vodi s temperature 850 °C (Roseov model). Na slici 10 u dijagramu temperatura - vrijeme prikazane su krivulje hlađenja ruba i jezgre čeličnog valjka.

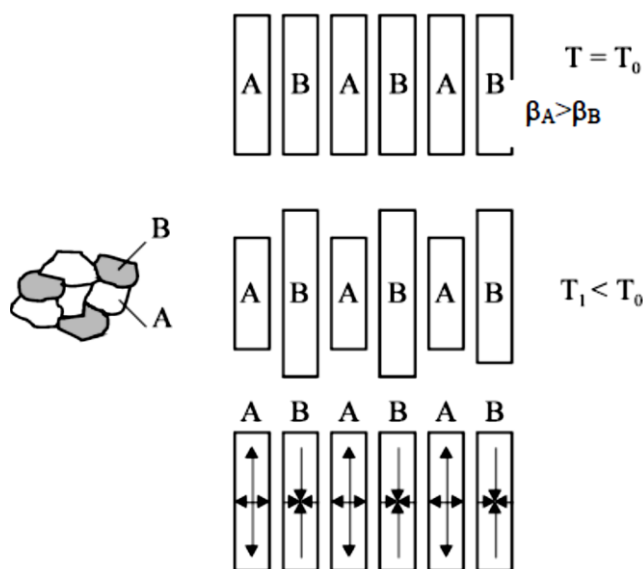


**Slika 10. Krivulje hlađenja i toplinska naprezanja za čelični valjak hlađen u vodi s 850 °C [6]**

Iz dijagrama je vidljivo da se rub hladi znatno brže od jezgre te je u točki „a“ temperaturna razlika najveća i iznosi oko 600 °C. Zbog razlike temperature ruba i jezgre u valjku nastaju toplinska naprezanja. Stezanje ruba (primjereno sniženoj temperaturi) onemogućava znatno toplija jezgra, što dovodi do pojave vlačnih naprezanja u rubnoj zoni i tlačnih naprezanja u jezgri valjka budući da oba naprezanja trebaju biti u ravnoteži (donji dijagram na slici 10). U trenutku kada se temperatura jezgre i ruba izjednače, toplinska naprezanja jednaka su nuli te nema nikakvih zaostalih naprezanja kao što pokazuje krivulja „a“ na slici 10. To vrijedi samo u slučaju kada toplinska naprezanja ne dostižu vrijednost granice razvlačenja (tečenja)  $R_e$ . Stoga krivulja „a“ vrijedi za neki materijal s relativno visokom granicom razvlačenja. Krivulje „b“ i „c“ vrijede za neki materijal s nižom vrijednošću  $R_e$  pa toplinska naprezanja lako dostižu njen iznos. Nakon točke „A“ dolazi do stezanja jezgre (krivulja „c“) i smanjenja vlačnih naprezanja u rubnoj zoni (krivulja „b“) pa su u točki „B“ toplinska naprezanja ruba i jezgre jednaka nuli, a

uz daljnje odvođenje topline dolazi do pojave tlačnih zaostalih naprezanja na rubu i vlačnih zaostalih naprezanja u jezgri. Veličina zaostalih naprezanja je to veća što je veća temperaturna razlika u točki „A“, što znači da se s povećanjem masivnosti komada, odnosno intenziteta ohlađivanja, mogu očekivati veća zaostala naprezanja. Nadalje, materijal s višom granicom razvlačenja kod povišenih temperatura imati će manja zaostala toplinska naprezanja pri gašenju [6].

Zaostala naprezanja drugog reda ( $\sigma^{\text{II}}$ ) nastaju, primjerice, kod višefaznih materijala koji posjeduju strukturne faze s različitim koeficijentima toplinske dilatacije. Slika 11 prikazuje shematski jedan dvofazni sustav gdje faza A ima veći koeficijent toplinskog istezanja od faze B.



**Slika 11. Pojava zaostalih naprezanja kao posljedica različitih koeficijenata toplinske dilatacije [6]**

Pretpostavi li se da na nekoj temperaturi  $T_0$  nisu prisutna nikakva naprezanja, hlađenjem na temperaturu  $T_1$  faza A ima veću tendenciju smanjenja volumena (skupljanja) od faze B. Budući da su obje faze čvrsto spojene granicama faza, u fazi A javljaju se (i eventualno zaostaju) vlačna naprezanja, a u fazi B tlačna naprezanja u istom iznosu.

Zaostala naprezanja trećeg reda ( $\sigma^{\text{III}}$ ) prisutna su u svakom realnom materijalu koji nema idealnu mikrostrukturu. Kod materijala s kristalnom strukturom (svi metalni materijali, neke keramike i polimeri) prisutne su kristalne nepravilnosti, tj. svi atomi nisu uredno smješteni na

svojim položajima u kristalnoj rešetki, već su prisutne točkaste, linijske i površinske nepravilnosti, odnosno praznine, uključinski/zamjendbeni atomi, bridne i vijčane dislokacije te malokutne i velikokutne granice zrna. Sve navedene nepravilnosti uzrokuju prisustvo zaostalih naprezanja trećeg reda [6].

Uzroci pojave zaostalih naprezanja su:

- uvjetovani materijalom
  - višefazni sustavi, nemetalni uključci, točkaste nepravilnosti
- uvjetovani izradom (podjela na glavne grupe tehnoloških postupaka prema DIN 8580)
  - lijevanje (toplinska zaostala naprezanja)
  - obrada deformiranjem (posljedica nehomogenih deformacija)
  - razdvajanje (posljedica brušenja)
  - spajanje (zaostala naprezanja zavarivanjem)
  - prevlačenje (zaostala naprezanja slojeva)
  - promjena svojstva materijala (indukcijsko kaljenje, nitriranje, cementiranje)
- uvjetovani eksploatacijom
  - mehanički (plastične deformacije)
  - toplinski (toplinska zaostala naprezanja)
  - kemijski (difuzija vodika kod elektrokemijske korozije).

### 3.4. Posljedice zaostalih naprezanja i deformacija

Kako se zavareni spoj steže, uslijed više ili manje onemogućenog stezanja zavar se prvo plastično, a potom i smanjenjem temperature elastično deformira. Uslijed elastične deformacije zavar je pod zaostalim vlačnim naprežanjem, te iz toga proizlazi da su zadnje ohlađena mjesta pod vlačnim zaostalim naprežanjima, dok se u okolini stvaraju tlačna naprežanja.

Posljedice zaostalih naprežanja i deformacija [11]:

1. Zbrajanjem radnih i zaostalih naprežanja smanjuje se nosivost konstrukcije. Pošto zaostala naprežanja mogu dosegnuti  $R_e$ , radna naprežanja će uzrokovati lokalne plastične deformacije na određenim mjestima. Plastične deformacije počinju kada su ekvivalentna naprežanja ( $\sigma_{ekv}$ ) viša od granice razvlačenja ( $R_e$ ).

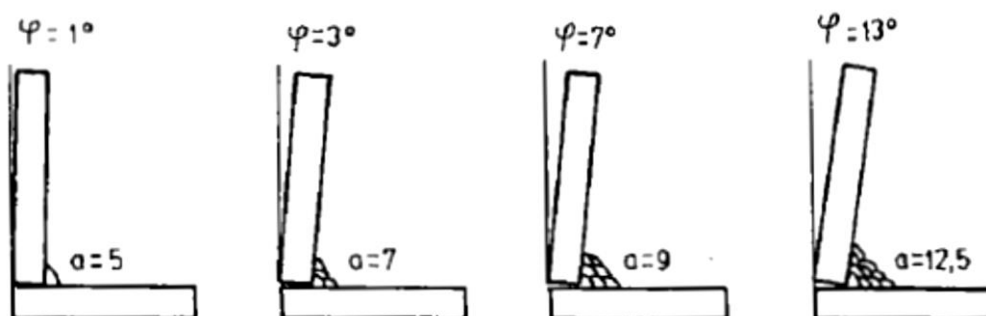
2. Kod debelostjenih konstrukcija zaostala naprezanja su troosna čime se povećava sklonost krhkom lomu i olakšava se inicijacija i propagacija pukotina. Posebno nepovoljna su vlačna zaostala naprezanja.
3. Visoka razina vlačnih zaostalih naprezanja i zbroj radnih i zaostalih naprezanja povećava sklonost pojavi pukotina zbog korozije uz naprezanje, kao i drugim vrstama korozije. Kod visokih vlačnih naprezanja također se bitno smanjuje i dinamička nosivost.
4. Deformacije koje predstavljaju odstupanja od teorijskog oblika uzrokuju dodatna naprezanja na savijanje, smanjuju stabilnost konstrukcije, pa je pouzdanost deformiranih elemenata smanjena. Stezanja i deformacije se ne mogu izbjeći, ali se mogu spriječiti prevelika odstupanja od teorijskog oblika.

### 3.5. Mjere za smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija

Nije moguće potpuno eliminirati zaostala naprezanja i deformacije, ali postoje mjere za njihovo smanjenje [7,10]:

1. Smanjenje količine depozita

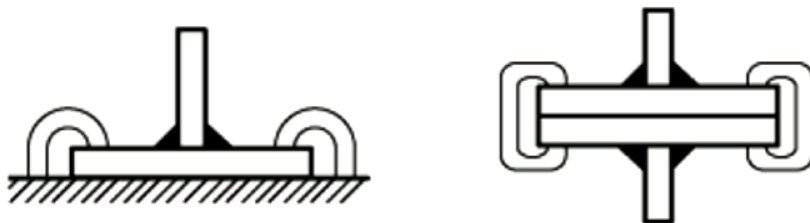
Smanjenjem presjeka i debljine zavora, duljine i broja prolaza smanjuje se i količina lokalno unesne topline. Na slici 12 prikazana je ovisnost kutne deformacije o broju prolaza.



Slika 12. Veličina kutne deformacije u zavisnosti o broju prolaza [11]

## 2. Primjena steznih naprava

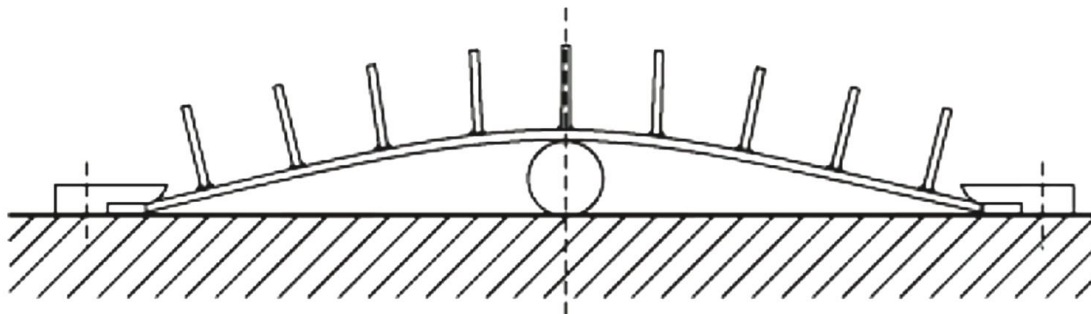
Učvršćenjem limova onemogućeno je slobodno stezanje što smanjuje kutne deformacije (Slika 13).



**Slika 13. Primjena steznih naprava [8]**

## 3. Prednaprezanje

Moguće je predsaviti nosač prije zavarivanja u suprotnom smjeru od kutnih deformacija (Slika 14). Svi zavari su sa gornje strane cijevi što uzrokuje kutnu deformaciju. Cijev je prednapregnuta za iznos kutne deformacije u suprotnu stranu, tako da nakon zavarivanja bude ravna.

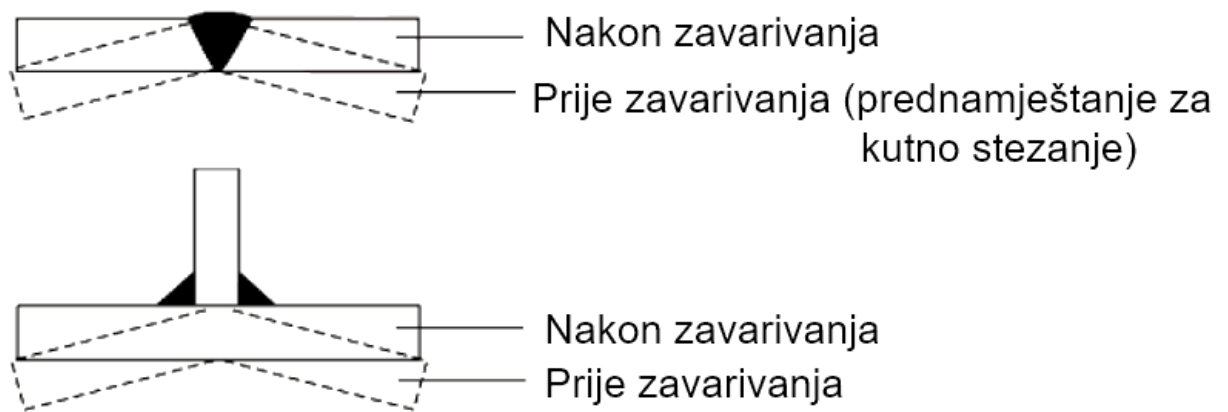


**Slika 14. Prednaprezanje cijevi [8]**

## 4. Stavljanje izvan pravog položaja

Kada znamo kolika su stezanja i kutne deformacije nakon zavarivanja, radne komade možemo postaviti za tu vrijednost izvan pravog položaja da bi deformacije dovele predmet u željeni položaj nakon zavarivanja (Slika 15).



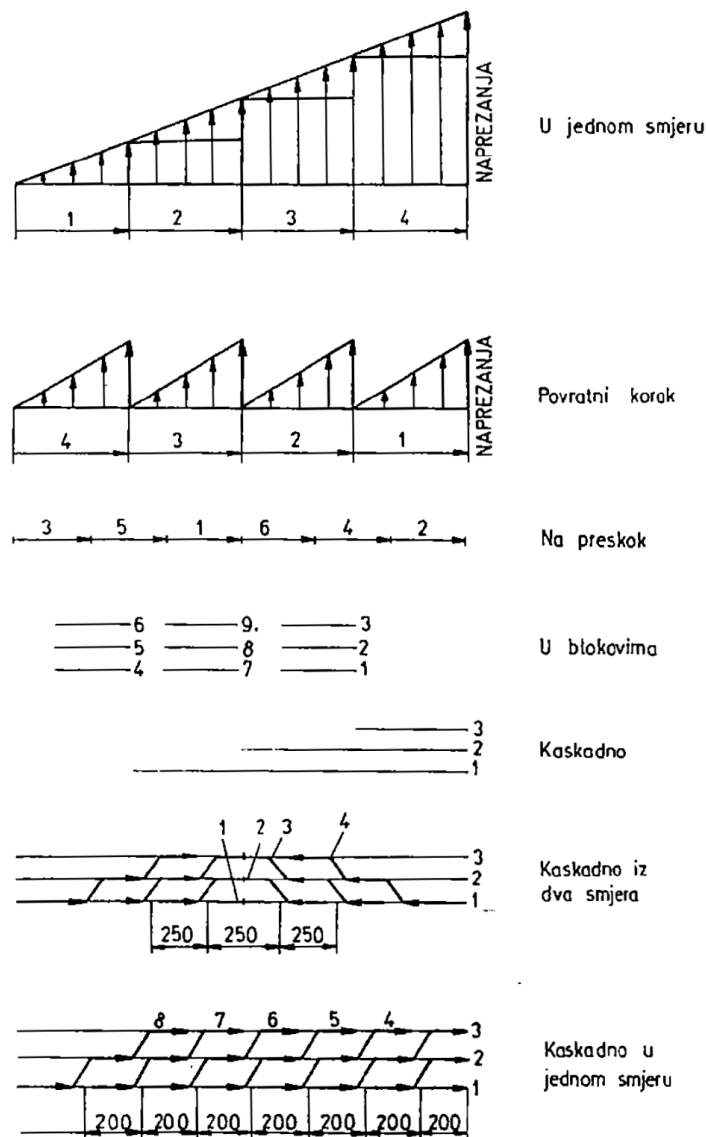


**Slika 15. Prednamještanje radnog komada [8]**

## 5. Slijed zavarivanja

Najviša naprezanja i deformacije na kraju zavara nastaju prilikom zavarivanja od jednog kraja predmeta do drugog kraja pa se zbog toga primjenjuju različite tehnike pri polaganju pojedinih prolaza (Slika 16):

- u jednom smjeru (nepovoljno)
- povratni korak
- na preskok
- u blokovima
- kaskadno.



**Slika 16. Razlika u napreztanjima kod različitih sljedova zavarivanja [11]**

## 6. Balansna tehnika

Kod zavarivanja kutnog zavara efekt balansiranja deformacija postiže se paralelnim zavarivanjem lijeve i desne strane kutnog zavara te se tako izbjegava pojava velikih kutnih deformacija.

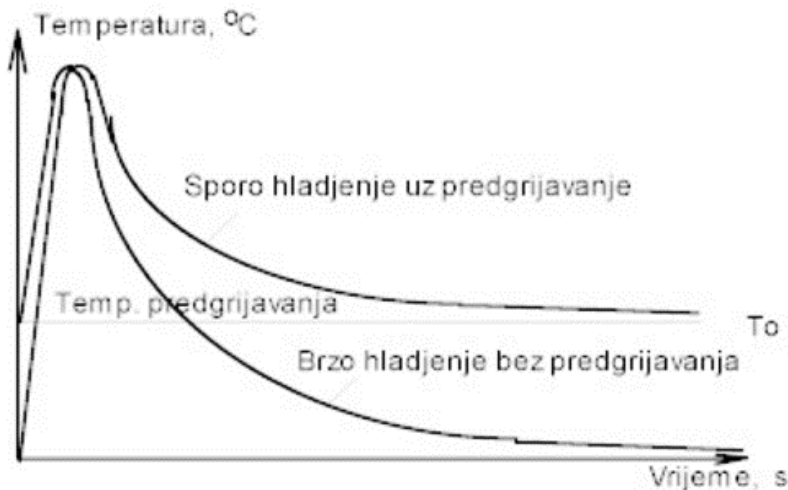
## 7. Simetričan raspored zavara u konstrukciji

Ako je zavar ekscentrično smješten dolazi do savijanja lima. Ako se zavar smjesti u simetralu ili se postave dva simetrična zavara, neće biti savijanja.

## 8. Predgrijavanje [12]

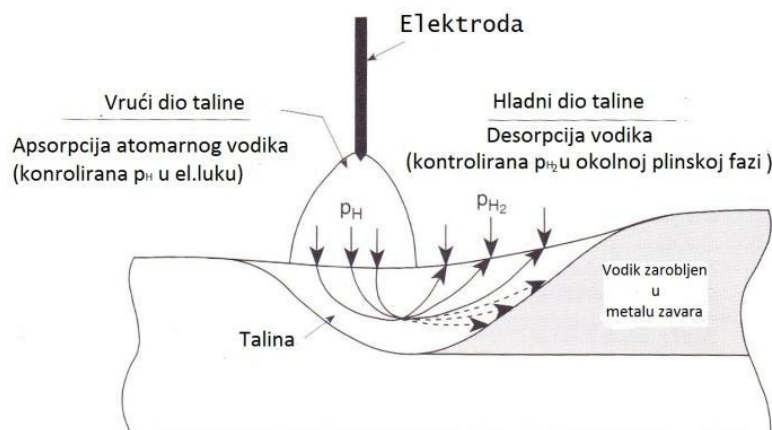
Predgrijavanje podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad okolne temperature na propisanu temperaturu  $T_0$  prije početka zavarivanja te održavanje temperature  $T_0$  za vrijeme zavarivanja. Predgrijavanje je primarno unošenje topline u osnovni materijal na mjestu zavora, a sekundarno se izvorom energije zavarivanja (npr. električnim lukom) unosi toplina u zavar, pa su konačni efekti rezultat primarnog i sekundarnog unošenja topline. Najčešće (za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste čelike) se predgrijavanje vrši u cilju izbjegavanja hladnih pukotina, jer se predgrijavanjem postižu efekti suprotni onima koji uzrokuju hladne pukotine. Hladne pukotine uzrokuje krhka martenzitna struktura, difuzijski vodik i reakcijska zaostala naprezanja. Predgrijavanje se u ovom radu nije provodilo. Predgrijavanjem se postižu ovi efekti:

- a) Smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja topline i zone taljenja u odnosu na veće brzine, ako se ne vrši predgrijavanje. Smanjenjem brzine hlađenja smanjuje se količina tvrdih faza (zakaljene martenzitne ili nekih manje tvrdih struktura) (Slika 17).



**Slika 17. Predgrijavanje zavarenog spoja [12]**

- b) Omogućavanje izlaska (efuzije) difuzijskog vodika. Atomarni difuzijski vodik lakše difundira kroz metalnu kristalnu rešetku pri višim temperaturama jer je srednji razmak između atoma metala veći. Mehanizam apsorpcije vodika prikazan je na slici 18. Ovaj mehanizam nije promatran u ovom radu.



**Slika 18. Mehanizam apsorpcije vodika [13]**

Primarni utjecajni čimbenik za određivanje temperature predgrijavanja je kemijski sastav čelika. Količina ugljika i ostalih legiranih elemenata ima značajan utjecaj na mehanička svojstva, ali i na zakaljivost i prokaljivost čelika. Pri tome ugljik povisuje zakaljivost, a ostali legirni elementi prokaljivost. U svrhu određivanja kaljivosti čelika, uveden je pojam ekvivalenta ugljika *CET*. Konstrukcijski čelici sa maksimalnim ekvivalentom ugljika  $CET = 0,22 \%$  se zavaruju bez predgrijavanja sa, gotovo svim, poznatim postupcima. Pri većim udjelima ugljika i većim debljinama ploča određujemo temperaturu predgrijavanja. *CET* je izračunat sukladno normi EN 1011-2 koji se određuje po formuli:

$$CET = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (8)$$

Ekvivalent ugljika za čelik S355 je 0,345 %. Temperatura predgrijavanja  $T_{pr}$  dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$T_{pr} = 697 \times CET + 160 \times \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \quad (9)$$

Gdje je:

- HD – udio vodika u metalu zavora (prema EN 1011-2 iznosi 2 ml/100 g)
- d – debljina materijala (mm)
- Q – unos topline po centimetru duljine zavora (kJ/cm).

#### 4. MJERENJE ZAOSTALIH NAPREZANJA

Usporedno sa spoznajom o zaostalim naprezanjima razvile su se i različite metode za njihovo mjerenje. Mjerenje zaostalih naprezanja uglavnom se dijeli na razorne, polurazorne i nerazorne metode.

Grupu razornih i polurazornih metoda čine različiti čisto mehanički ili mehaničko-električki postupci. Ovim metodama moguće je samo mjerenje zaostalih naprezanja 1. reda. Nedostatak je da se elementi konstrukcije ili strojeva ispitani ovim metodama ne mogu dalje koristiti. Postupci mjerenja zaostalih naprezanja rengenskom difrakcijom, ultrazvukom i magnetskim metodama spadaju u skupinu nerazornih metoda. Osim što nimalo ne oštećuju ispitane dijelove, s nekim od ovih postupaka moguće je izmjeriti i mikro zaostala naprezanja ( $\sigma^{\text{II}}$  i  $\sigma^{\text{III}}$ ) [6].

U nastavku su navedeni različiti postupci za mjerenje zaostalih naprezanja [14]:

##### 1. Metoda bušenja otvora

Tehnika koja se najčešće koristi za mjerenje zaostalih naprezanja jer je relativno jednostavna, jeftina i brza. Metoda generalno obuhvaća sve grupe materijala, ali za materijale mora biti poznata izotropnost i elastičnost. Ova metoda spada u polurazorne metode koja se koristi za distribuciju naprezanja po cijelom presjeku debljine materijala, bilo kojeg smjera i veličine. Jedino oštećenje tijekom ispitivanja je mali provrt koji se nakon ispitivanja može obnoviti. Izbušeni otvor (promjera 1,8 mm i 2 mm dubine) prekida tok sila na površini i tako dovodi do relaksacije materijala oko otvora. Tijekom oslobađanja površinskih sila mjeri se stvarna dimenzija provrta, koja se direktnom vezom sa modulom elastičnosti, prema izrazu (4), izračunavaju zaostala naprezanja [15].

Nedostaci tehnike su ograničena osjetljivost, potencijalne greške i nejasnoće vezane za dimenzije rupe (promjer, profil, dubina i sl.), hrapavost površine i priprema površine, ograničena osjetljivost na deformacije i rezolucija. Metoda se mora provesti strojno kako bi se osigurala preciznost i pouzdanost izrade provrta.

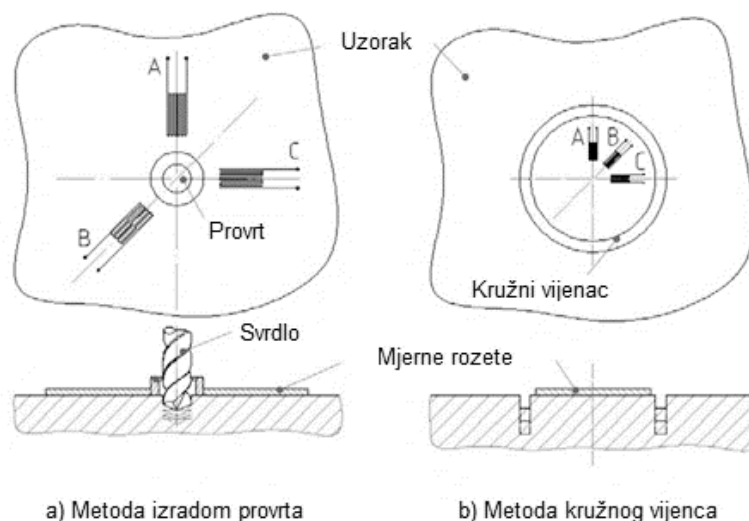
Preciznost ove metode je  $\pm 10$  MPa u području ispod 70 % granice tečenja, a za područje iznad 70 % granice tečenja potrebna je dodatna kalibracija.

Slika 19 prikazuje tipičnu opremu za bušenje. Potrebno je računalo za obradu podataka, uređaj za izradu provrta male dubine i analizu.



**Slika 19. Oprema za bušenje [14]**

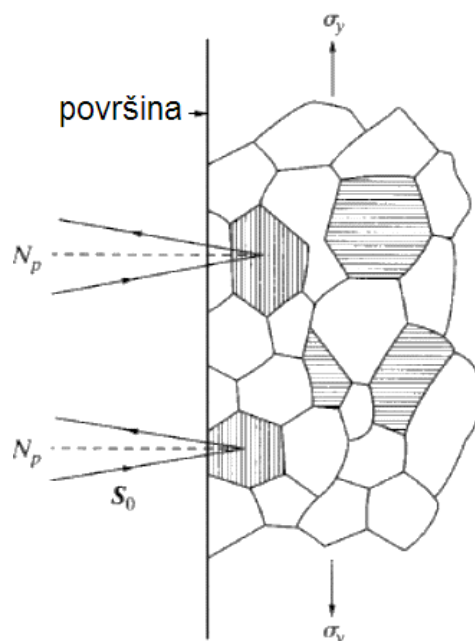
Kod čeličnih konstrukcija najjednostavnija procedura za mjerenje postojećeg naprezanja i dilatacija je da se koristi rozeta od obično tri mjerne trake. Takva rozeta je šematski prikazana na slici 20, na kojoj se vide tri radialno postavljene mjerne trake postavljene tako da im se središta poklapaju sa točkom koja se mjeri. Sve tri mjerne trake su postavljene na udaljenosti  $R$  od središta otvora koji treba formirati. Osim provrta može izraditi i kružni vijenac, a princip mjerenja je isti.



**Slika 20. Shematski prikaz mjerenja metodom bušenja otvora [16]**

## 2. Mjerenje difrakcijom X-zraka

Difrakcijom X-zraka zaostala naprezanja mjere se preko udaljenosti između kristalografskih ravnina. Kada je materijal izložen naprezanju, udaljenost ravnina kristalne rešetke se povećava, a pod pritiskom se smanjuje. Tijekom mjerenja uzorak je ozračen visokoenergetskim X-zrakama koje prodiru u površinu. Neke od tih zraka se odbijanju od kristalnih materijala po Braggovom zakonu. Detektor, koji se pomiče oko uzorka, bilježi intenzitet difraktiranih zraka. Položaj vršnih vrijednosti (pikova) omogućuje mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku. Nužno je potrebna kalibracija na materijalu sa istom mikrostrukturom kako bi se dobile elastične konstante materijala, mjerene pomoću X-zraka. Slika 21 prikazuje model difrakcije X-zrake.



Slika 21. Difrakcija x-zrake [14]

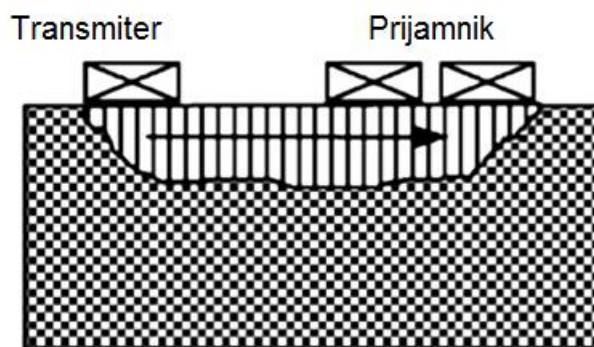
Ova metoda može se koristiti na svim kristalnim materijalima. Mjerenje je relativno jednostavno, a oprema lako dostupna. Nedostatci ove metode su ograničenje na veličinu i geometriju ispitnog uzorka, moguća su samo osnovna površinska mjerenja i potrebna je priprema površine (elektropoliranje). Preciznost ove metode je  $\pm 10$  MPa za homogen materijal, za bolju preciznost na heterogenom materijalu potrebna je dodatna kalibracija.

### 3. Mjerenje ultrazvučnom metodom

Ultrazvuk je dio zvučnog spektra, čija je frekvencija iznad područja čujnog ljudskom organizmu, dok zvuk predstavlja vremenski promjenjivo mehaničko titranje čestica kroz medij.

Ultrazvuk, kao i zvuk, je definiran s tlakom i brzinom gibanja čestice u prostoru.

Za mjerenje se koristi osjetljivost brzina ultrazvučnih valova koji putuju kroz materijal do mjesta naprezanja unutar njega. Kako polarizirani ultrazvučni valovi imaju različite brzine, dolazi do interferencije. Posljedično dolazi do promjene amplitude i faze emitiranih valova. Promjene u brzini valova u materijalu su izravno povezane s veličinom i smjerom prisutnih naprezanja. Budući da promjene brzine ovise o području naprezanja tijekom cijelog ultrazvučnog puta, prostorna rezolucija je loša. Ovaj postupak omogućava mjerenje makro zaostalih naprezanja u velikom volumenu materijala, ali prostornu rezoluciju u materijalu ograničava prisutnost tekture.



**Slika 22. Shematski prikaz ultrazvučne metode [15]**

No, prednost postupka je mogućnost mjerenja osnovnog materijala i stoga je metoda pogodna za rutinske kontrole. Osim toga, oprema je prenosiva i brzo se dolazi do rezultata. Slika 22 prikazuje shematski prikaz metode. Val se šalje preko transmitera, interferira i vraća se natrag prema prijamniku. Razlikom poslanog i primljenog vala određuje se naprezanje u materijalu.



## 5. NUMERIČKE SIMULACIJE KOD ZAVARIVANJA

Kako bi se izbjegli mogući visoki troškovi eksperimenata počele su se sve više primjenjivati numeričke simulacije u svrhu određivanja optimalnih parametara, odnosno predviđanja mogućih problema (deformacija, zaostalih naprezanja i dr.) u zavarenim konstrukcijama. Numeričke simulacije se zasnivaju na metodi konačnih elemenata (MKE), a najveći problem predstavlja moguće dugo vrijeme potrebno za komputaciju (računanje). Stoga kada je to moguće, potrebno je zamijeniti 3D modele s 2D modelima, a u nekim situacijama je pogodno i korištenje 3D modela u kombinaciji s ljuskastim modelima. Kod simulacije mjesta koja su interesantnija potrebno je predstaviti manjim konačnim elementima, a ona koja nisu od prevelikog interesa većim kako vrijeme simulacije ne bi bilo predugačko.

Prednosti korištenja simulacijskih alata su:

- minimiziranje troškova proizvodnje
- smanjenje proizvodnih rizika u najranijoj fazi razvojnog ciklusa proizvoda
- smanjenje ili čak uklanjanje deformacija
- izbjegavanje hladnih pukotina računanjem zaostalih naprezanja
- kontrola i smanjenje tvrdoće i veličine zrna u zoni taljenja i ZUT-u.

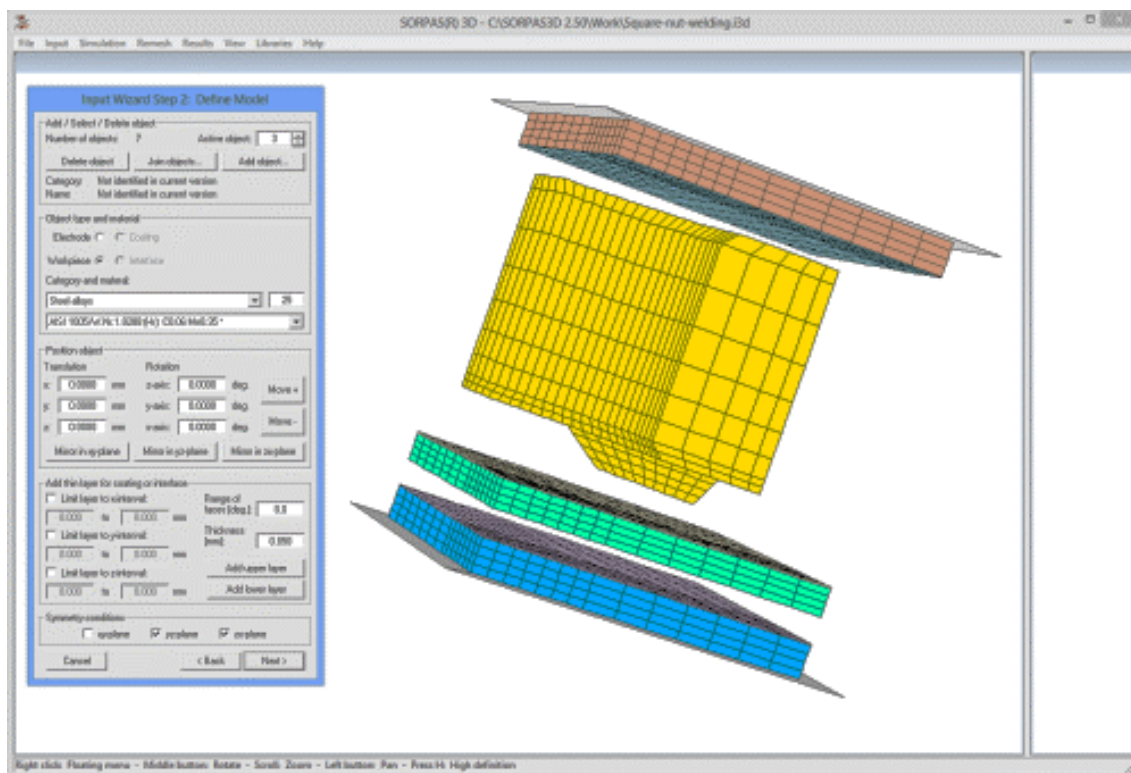
Numeričke simulacije zavarivanja danas pronalaze svoj značaj u autoindustriji, zrakoplovnoj industriji, brodskoj industriji, energetici itd. Svim navedenim industrijama na prvom mjestu je sigurnost. U praksi se vrlo lako može previdjeti neka sitnica koja može biti glavni uzrok smanjenja funkcije cjelokupne konstrukcije ili čak potpunog uništenja. Bitne informacije koje daju ovakve simulacije su analize, kao što su temperaturni raspon, udio pojedinih faza, različite deformacije, naprezanja, veličinu kristalnog zrna itd. Ovisno o mogućnostima pojedine aplikacije moguće je provesti više ili manje različitih analiza.

Razvitak i korištenje programa za simuliranje zavarivanja ubrzano raste, a programi koji se danas najviše koriste su:

- SORPAS (2D i 3D)
- Simufact.welding
- ABAQUS
- Sysweld (Visual Weld 11.0, Visual Environment).

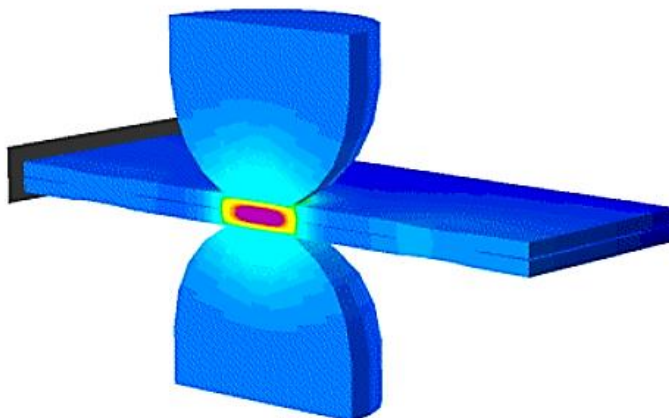
## 5.1. SORPAS (2D i 3D)

SORPAS je profesionalna programska aplikacija za simulaciju i optimizaciju elektrootpornog (EO) zavarivanja. Lako se koristi te nisu potrebna znanja o numeričkim simulacijama kao kod drugi aplikacija za numeričku simulaciju. Sučelje programa prikazano je na slici 23.



Slika 23. Radno sučelje SORPAS softvera [16]

Može se koristiti u simulaciji zavarivanja svih vrsta čelika, aluminijskih legura, legura titana, legura bakra, legura bazirana na niklu, čistih metala itd. U aplikaciji je moguće, za pojedini proces, izračunati raspodjelu struje i topline s obzirom na tip struje za zavarivanje i materijala, izračunati prijenos topline, promjenu svojstva materijala ovisno o temperaturi, vidjeti nastale deformacije, optimizirati struju zavarivanje itd. U 3D verziji rezultati su pregledniji te je grafičko sučelje lakše za upotrebu. Primjer simulacije prikazan je na slici 24.



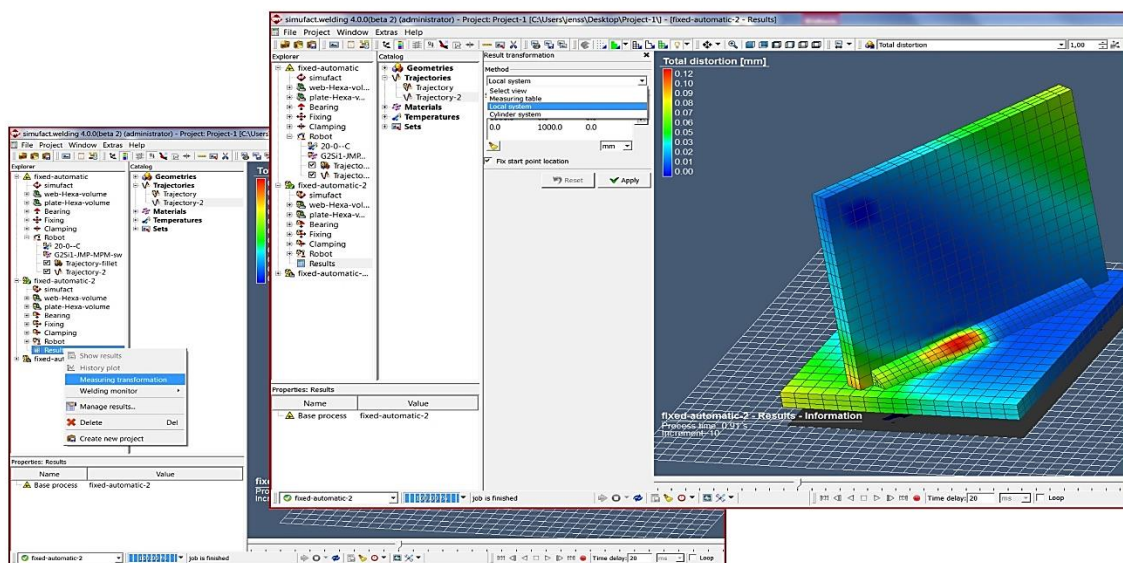
**Slika 24. Simulacija EO zavarivanja u SORPAS-u [16]**

## **5.2. Simufact.welding**

Simufact.welding nudi mogućnost izračuna naprezanja nastalih zavarivanjem, deformacije i promjenu svojstava materijala pomoću grafičkog sučelja. Na taj način se vrlo lako mogu otkriti kritične deformacije, optimizirati proces zavarivanja, alate za stezanje, a time i sam proizvod. Također, može se vidjeti ponašanje materijala tijekom zavarivanja, razvoj zone utjecaja topline, nastanak zaostalih naprezanja te raspored temperature tijekom procesa. Najvažniji cilj izračuna u Simufact.welding-u je predvidjeti deformacije nastale zavarivanjem.

Ovaj program nudi rješenja koja pokrivaju veliki broj obrada i ponašanje metala u proizvodnim procesima. Paket nudi tri glavne aplikacije, a to je proces formacije (Simufact Forming) u kojoj se izrađuju modeli, proces spajanja (Simufact Welding) raznim tehnologijama i proces aditivne obrade materijala (Additive Manufacturing) kao što je 3D printanje. [17]

Sučelje programa prikazano je na slici 25.



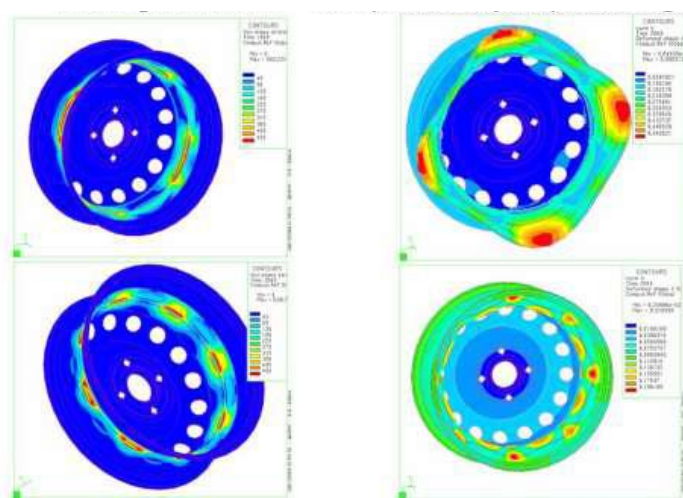
Slika 25. Sučelje Simufact.welding-a [17]

### 5.3. Sysweld (Visual Weld 11.0, Visual Environment)

Sysweld je program za simulaciju zavarivanja i numeričku analizu MECAS ESI grupe. Sastavljen je od više vrsta potprograma koji se koriste za analizu u raznim granama strojarstva kao što su automobilska industrija, zrakoplovna industrija, ali i u općenito u samom procesu konstruiranja proizvoda koji je načinjen postupkom zavarivanja. Program Sysweld je vrlo kompleksan, pa se za komercijalnu upotrebu koristi sučelje Visual Environment (Visual-Weld). Numerička simulacija zavarivanja Visual-Weld-om daje moguće rezultate:

- Toplinsko-metaluršku analizu - temperaturna polja u konstrukciji koja se zavaruje vidljiva su u svakom trenutku. Vrlo je važna i mogućnost faznog prikaza dijagrama koji pokazuje vrstu mikrostrukture u konstrukciji u svakom trenutku zavarivanja.
- Mehaničku analizu - moguće je provjeriti nastale deformacije te različite vrste naprezanja (ekvivalentna naprezanja pomoću Von Mises-ove formule, srednje vrijednosti naprezanja, itd.). Ako se konstrukcija sastoji od više zavara ili jedan zavara od više prolaza, moguće je provesti analizu nakon svakog pojedinog prolaza što omogućava detaljan uvid u proces.
- Provjera tvrdoće - moguća provjera tvrdoće za nelegirane konstrukcijske čelike kao što je čelik S355.

Također, program nudi široku bazu materijala, postupaka zavarivanja te različite mogućnosti grafičkih prikaza nakon simulacije. Osim što je u aplikaciji moguće provesti simulaciju zavarivanja, moguće je i provesti simulaciju toplinske obrade. Proces toplinske obrade vrlo je sličan procesu zavarivanja, promjene u materijalu su gotovo identične. Jedina razlika je što se kod toplinske obrade toplinski obrađuje cijeli radni komad, a ne samo dio komada kao kod zavarivanja. Slika 26 prikazuje rezultate deformacija naplatka za automobilsku industriju. Čelični naplatci se sastoje od dva dijela koji se spajaju tehnologijom zavarivanja. Kod ovakvih malih dijelova utjecaj simulacije je nešto manji naspram simulacije cjelokupne konstrukcije automobila.



**Slika 26. Analiza rezultata deformacija [18]**

## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

### 6.1. Opis eksperimenta

Cilj eksperimentalnog dijela rada je odrediti tehnologiju zavarivanja MAG postupkom za sučeljeni spoj s V pripremom, čelika kvalitete S355. U eksperimentu se radi komparativna analiza s primjenom dvije pripreme zavora i dvije razine unosa topline. Pomoću programske aplikacije Visual Weld 11.0 replicira se istovjetna situacija i uspoređuju se stvarne deformacije. Cijeli eksperiment je izveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Za provedbu ovog eksperimenta potrebna su četiri para ploča od čelika S355, oprema za zavarivanje MAG postupkom i automat za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 („traktor“) kojim osiguravamo kontinuiranost procesa uz zadani položaj pištolja i brzinu zavarivanja.

U ovom radu razmatrane su dvije ulazne varijable: kut pripreme spoja i unos topline. Uz dvije različite pripreme spoja i dva različita unosa topline, eksperiment se sastoji od četiri stanja pokusa.

Eksperiment je proveden u dva dijela. Prvi dio sastoji se od zavarivanja pripremljenih ploča u laboratoriju, mjerenja deformacija i izrade makroizbrusaka. Drugi dio se sastoji od simulacija zavarivanja u programu Visual Weld Zavoda za zavarivane konstrukcije, s jednakim parametrima zavarivanja kao i u Laboratoriju.

## 6.2. Oprema za zavarivanje

### 6.2.1. Izvor struje

Za izradu zavarenih uzoraka eksperimentalnog dijela korištena je oprema slovenskog proizvođača DAIHEN VARSTROJ. Izvor struje je Welbee P500L (WB – P500L), potpuno digitaliziran i mikroprocesorski upravljani uređaj u koji je ugrađena invertorska tehnologija. Primjenom invertorske tehnologije veća je učinkovitost i manja potrošnja struje po kilogramu nataljenog materijala, napredno upravljanje i kvalitetno definirane sinergijske krivulje te jednostavna integracija sa automatiziranim i robotiziranim sustavima.

Izvor je konstruiran s invertorskom tehnologijom i ima jedinstvene mogućnosti integriranja s robotiziranim i vrhunskim CNC sustavima. Upravljanje i kontrola napona i struje luka izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete procesa zavarivanja. Na LCD ekranu, konzole za upravljanje, prikazane su trenutačne vrijednosti. Uređaj tijekom cijelog procesa pokušava održavati približne zadane vrijednosti.

Na slici 27 prikazan je izvor struje s dodavačem žice i jedinicom za hlađenje. Brzinu žice određuje sam uređaj, a vezana je sa zadanom strujom na kontrolnoj ploči.

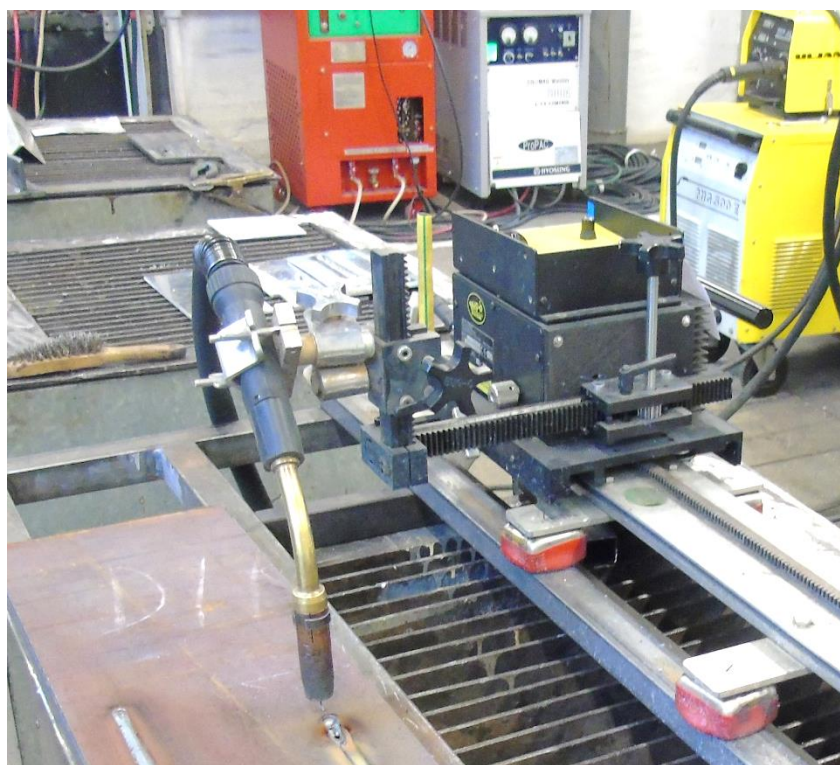


Slika 27. Izvor struje



### 6.2.2. Automat za zavarivanje

Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002 koristi se za rezanje i zavarivanje na ravnoj podlozi. Automat ima mogućnost uzdužnog gibanja preko zubne letve te mogućnost namještanja željene udaljenosti i nagiba pištolja od radnog komada, koji je za ovaj pokus namješten za desnu tehniku zavarivanja sa nagibom pištolja od  $10^\circ$ . Također, moguće je upravljati brzinama zavarivanja što je u ovom slučaju iznimno važno zbog točnog određivanja unosa topline. Na slici 28 prikazan je automat za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 s pričvršćenim pištoljem za zavarivanje.



**Slika 28. Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002**

### 6.3. Dodatni materijal i plin

Kao dodatni materijal korištena je žica oznake EZ-SG2 proizvođača Elektroda Zagreb. To je standardizirana žica (HRN EN ISO 14361-A) promjera 1,2 mm, pobakrena žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina. Koristi se za čelike za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do  $590 \text{ N/mm}^2$ . Kako čelik S355 ima granicu razvlačenja od  $355 \text{ N/mm}^2$ , ova žica zadovoljava jedan od uvjeta. Mehanička svojstva i kemijski sastav dani su u tablici 1.



**Tablica 1. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala [19]**

	Mehanička svojstva			
	$R_{el}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	$KV$ (- 40°C), J
	>430	500 - 640	>22	$\geq 47$
	Kemijski sastav			
Kemijski element	C, %	Mn, %	Si, %	Cu, %
Maseni udio	0,06 – 0,13	1,4 – 1,6	0,7 – 1,0	$\leq 0,3$

U eksperimentu je korištena mješavina zaštitnog plina 18 % CO<sub>2</sub> i 82 % Ar. Protok plina je bio 18 l/min za sve prolaze.

#### 6.4. Osnovni materijal

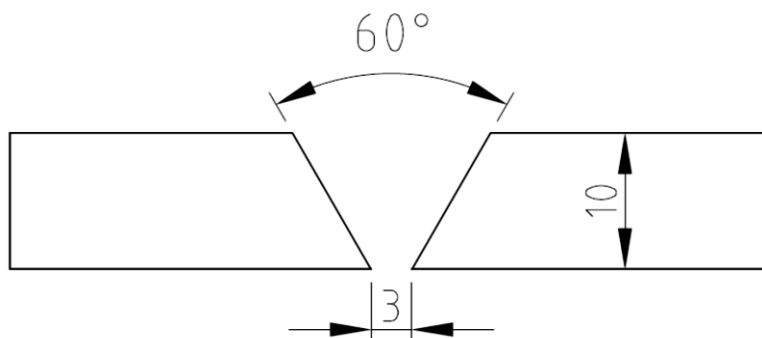
Osnovni materijal koji se koristio u eksperimentu je S355.

Čelik S355 (EN 10025-2) spada u opće konstrukcijske čelike za široku upotrebu uz odličnu zavarljivost te se često koristi zbog boljih mehaničkih svojstava s obzirom na uobičajeno upotrebljavan čelik S235. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima u širokom spektru debljina, ovisno o eksploatacijskim svojstvima. Široko se upotrebljava u građevinskoj, proizvodnoj, brodograđevinskoj i off-shore industriji zbog niske cijene i široke dostupnosti. [20]

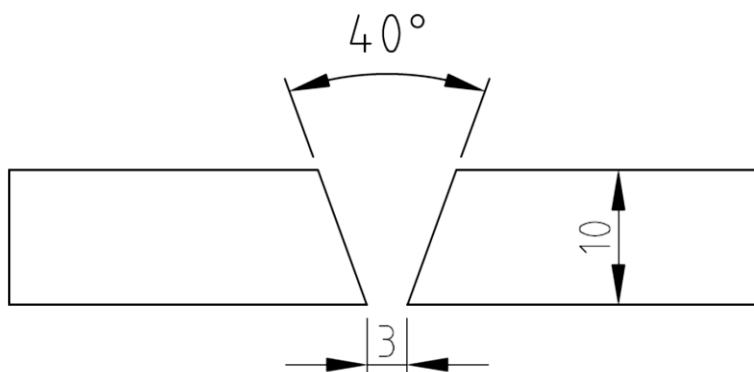
Toplinska obrada u svrhu očvrnuća čelika S355 nije preporučljiva, ali je u ograničenim mogućnostima dozvoljena. U slučaju da se toplinska obrada provodi, faktori poput vršne temperature, brzine zagrijavanja i hlađenja te vremena držanja ovise o obliku, veličini i debljini profila. Generalne preporuke za toplinsku obradu normalizacije je zagrijavanje na temperaturu 20 – 50 °C iznad temperature  $A_{c3}$  (911 °C) te držanja 3 min / 1 mm debljine. Očekivano poboljšanje mehaničkih svojstava je povećanje udarnog rada loma i čvrstoće materijala uz eliminaciju segregacija u obliku dendritnih zrna unutar mikrostrukture. [21]

## 6.5. Ploče za zavarivanje

Prije samog zavarivanja ploče je potrebno obraditi kako bi se dobile sve ploče jednakih dimenzija uz željenu pripremu za zavarivanje. Priprema spoja odrađena je strojno zbog točnosti kuta i na kraju zbog preciznosti konačnih rezultata. Dva para ploča imaju kut pripreme od  $60^\circ$  (Slika 29) i dva para od  $40^\circ$  (Slika 30). Konačne dimenzije ploča su 98 mm x 299 mm x 10 mm s međurazmakom od 3 mm.



Slika 29. Priprema spoja od  $60^\circ$



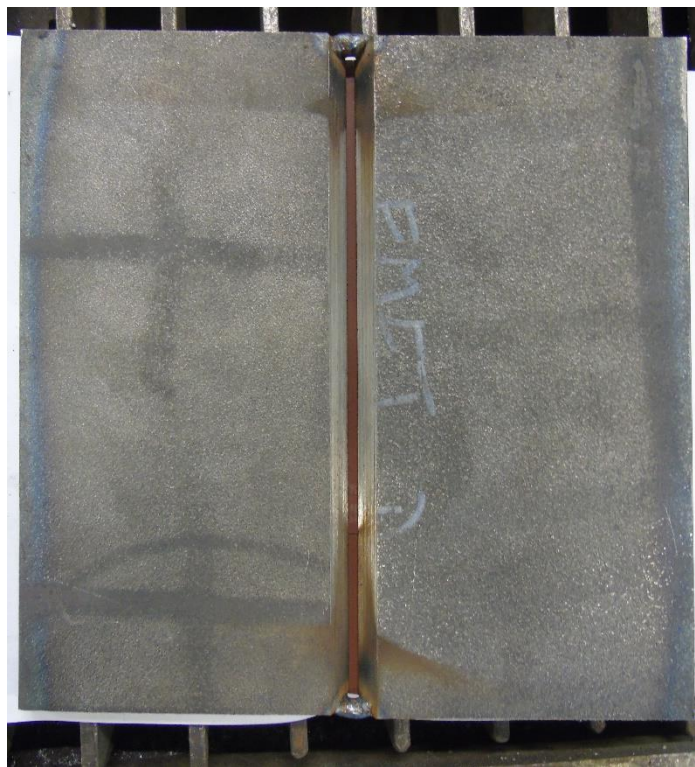
Slika 30. Priprema spoja od  $40^\circ$

Ukupno je pripremljeno osam ploča, pošto se eksperiment provodi u četiri stanja koja su prikazana u tablici 2. Kako bi se lakše uočio utjecaj pripreme spoja na deformacije, uzeta je minimalna ( $40^\circ$ ) i maksimalna ( $60^\circ$ ) vrijednost kuta pripreme spoja prema normi HRN EN ISO 9692-1 [22]. Zbog različitih kutova pripreme zavareni spojevi imaju različit depozit dodatnog materijala što direktno utječe na krajnju deformaciju zbog većeg volumena taline koja se skrućuje tijekom hlađenja. Osim kutova, unosi topline se značajnije razlikuje također zbog kasnije razlike u mjerenju deformacija.

Tablica 2. Stanja pokusa

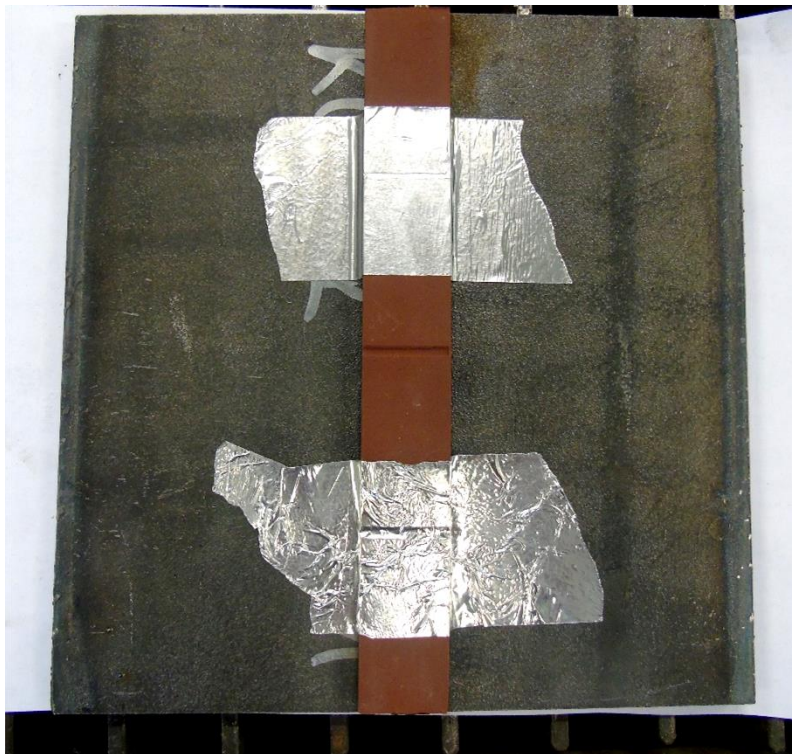
		ULAZNE VARIJABLE			
		Unos topline		Kut pripreme spoja	
STANJE POKUSA		$Q_1 = 15 \text{ kJ/cm}$	$Q_2 = 9 \text{ kJ/cm}$	$40^\circ$	$60^\circ$
	1.	×		×	
	2.	×			×
	3.		×	×	
	4.		×		×

Za provođenje eksperimenta potrebno je pripojiti ploče sa kratkim zavarom (oko 5 mm) na početku i na kraju ploča predviđenog zavora. Na slici 31 su prikazane pripojene ploče na razmaku od 3 mm, prema planu pokusa.



Slika 31. Pripojene ploče

Slika 32 prikazuje postavljene i pričvršćene keramičke podloške. Uloga podloške je pridržati talinu tijekom zavarivanja i dati korijenu zavara oblik. Kada ne bi bilo podloške, tada je prvo potrebno napraviti kvalitetan korijen zavara tehnikom njihanja, a zatim daljnje popune.



**Slika 32. Keramička podloška**

Nakon pozicioniranih i pripojenih ploča s postavljenom keramičkom podloškom, slijedi zavarivanje prvog prolaza prema zadanim parametrima (Slika 33). Nakon prvog prolaza određeno je vrijeme čekanja za sljedeći prolaz od 120 sekundi. Razlog čekanja je kontinuiranost i kontrola nad procesom i kasnije lakšeg modeliranja i provođenja simulacije.

Prema normi HRN EN ISO 1011-2 [23], za čelik S355 debljine 10 mm nije potrebno predgrijavanje. Predgrijavanje se koristi najčešće kod većih debljina i materijala koji su osjetljivi na hladne pukotine.



**Slika 33. Pripremljene ploče za zavarivanje**

## **6.6. Parametri zavarivanja**

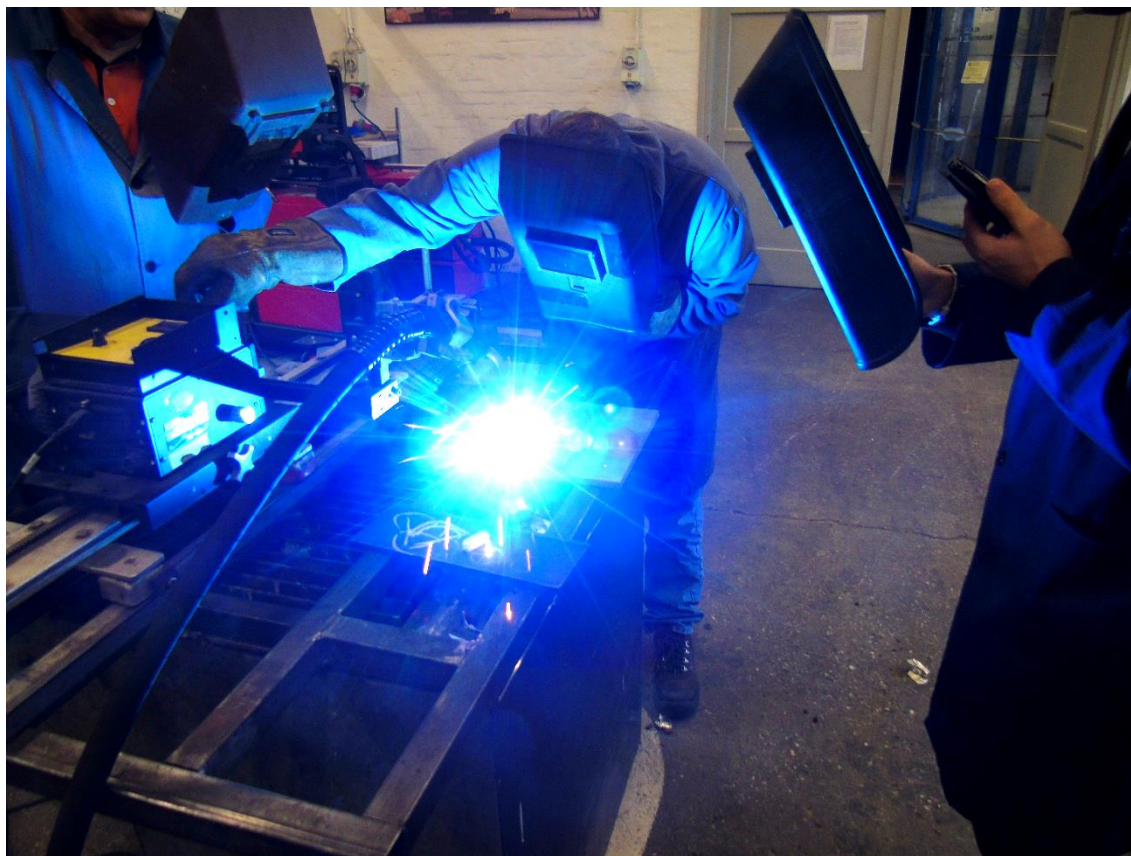
Zavarivanje je provedeno prema preddefiniranom planu pokusa. Za svaku ploču su pridruženi parametri s izračunatim unosom topline. Kako izvor struje mijenja parametre tijekom zavarivanja u cilju stabilnosti procesa, u tablici 3 dani su i stvarni parametri i stvarni unosi topline. Kod računalne simulacije koristiti će se stvarni podaci. Iz tablice 3 može se vidjeti da svaki parametar ima korekciju, uglavnom struja poraste, a napon padne što direktno utječe na unos topline.

Tablica 3. Parametri zavarivanja

Ploča 1	Struja, $I$ [A]		Napon, $U$ [V]		Unos topline, $Q$ [kJ/cm]		Brzina zavarivanja, $V_{zav}$ [cm/min]
Prolaz	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	
1.	270	298	30	28	15,5	16	25
2.		292		28,4		15,9	
Ploča 2	Struja, $I$ [A]		Napon, $U$ [V]		Unos topline, $Q$ [kJ/cm]		Brzina zavarivanja, $V_{zav}$ [cm/min]
Prolaz	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	
1.	270	310	30	27	15,5	16	25
2.		306		28		16,4	
Ploča 3	Struja, $I$ [A]		Napon, $U$ [V]		Unos topline, $Q$ [kJ/cm]		Brzina zavarivanja, $V_{zav}$ [cm/min]
Prolaz	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	
1.	156	155	18	17,4	9	8,6	15
2.		150		17,5		8,4	
3.	130	133	21,5	21,5		9,2	
Ploča 4	Struja, $I$ [A]		Napon, $U$ [V]		Unos topline, $Q$ [kJ/cm]		Brzina zavarivanja, $V_{zav}$ [cm/min]
Prolaz	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	Zadana vrijednost	Izmjerena vrijednost	
1.	156	156	18	17,5	9	8,7	15
2.		155		17,5		8,7	
3.		150		17,7		8,5	
4.		150		18		8,6	

Po zadanim parametrima može se početi sa zavarivanjem uzoraka kao što je vidljivo na slici 34.





**Slika 34. Zavarivanje uzoraka**

Na uzorcima se razlikuje broj prolaza. Na pločama 1 i 2 napravljena su po dva prolaza. Ploča 3 ima predviđenih tri prolaza, dok ploča 4 ima četiri prolaza iz razloga što s preddefiniranim parametrima nije bilo moguće ispuniti zavareni spoj. Iz toga je možemo zaključiti da su potrebna četiri prolaza ili povećanje unosa topline, u ovom radu je odabran prolaz više. Na slici 35 prikazan je izgled drugog i na slici 36 treći prolaza na zorku 3. Pomoću ovakvih slika lakše je odrediti, kasnije, 3D model zavara za pojedini prolaz.



**Slika 35. Izgled drugog prolaza na uzorku 3**



**Slika 36. Izgled trećeg prolaza na uzorku 3**



## 6.7. Izrada ispitnih uzoraka

Nakon zavarivanja ploče su ostavljene na hlađenju do sobne temperature. Ploče su se očigledno deformirale, no potrebno je izmjeriti deformacije. Prvi korak bio je označavanje uzorka iz cijele ploče, kao što je prikazano na slici 37.



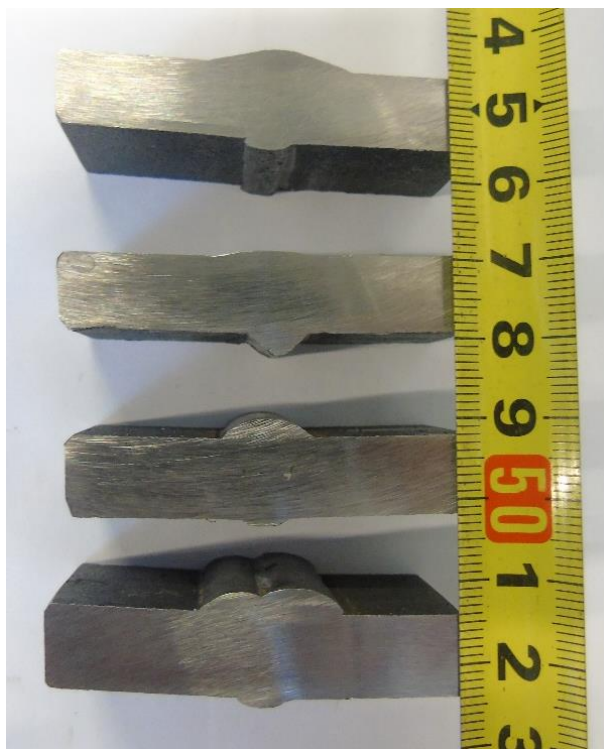
**Slika 37. Označavanje ploče za izrezivanje uzoraka**

Nakon označavanja najprije je uslijedilo plinsko rezanje rezanje uzduž zavora dovoljno daleko kako ne bi toplinski oštetili metal zavora ili ZUT. Kod plinskog rezanja korišteni su plinovi acetilen i kisik uz brzinu rezanja od 30 cm/min. Poslije hlađenja ploča slijedilo je rezanje tračnom pilom, okomito na zavar. Postupci su prikazani na slici 38.



**Slika 38. Izrezivanje uzoraka plinski i tračnom pilom**

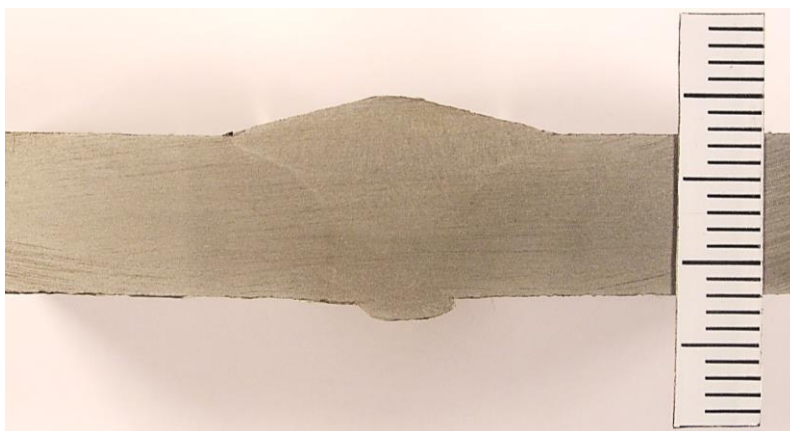
Nakon rezanja potrebna je gruba obrada oštarih rubova i promatranih površina, pošto od pile ostaje velika hrapavost površine. Grubo obrađeni uzorci (Slika 39) se dalje bruse sa brusnim papirom granulacije redom P 120, P 320, P 500 i P 600.



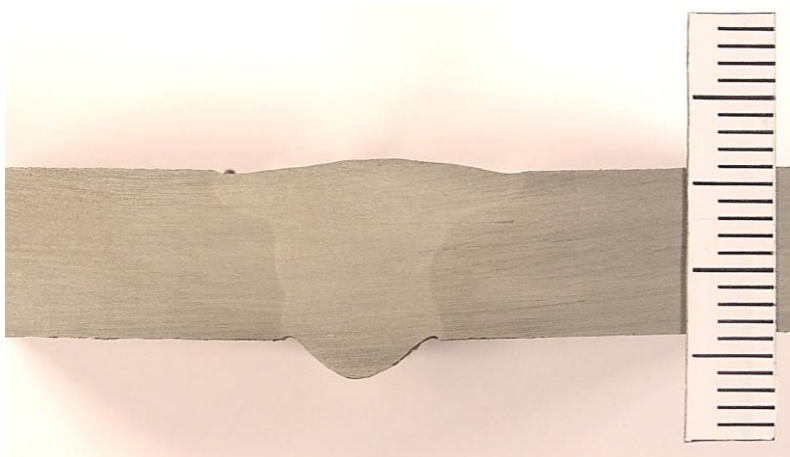
**Slika 39. Uzorci nakon grube obrade**

Vidljivost makroizbruska je tek nakon nagrizanja u 3% nitalu. Nital je otopina dušične kiseline ( $\text{HNO}_3$ ) u etilnom alkoholu ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). Vrijeme nagrizanja je trajalo 60 sekundi, a reakcija se

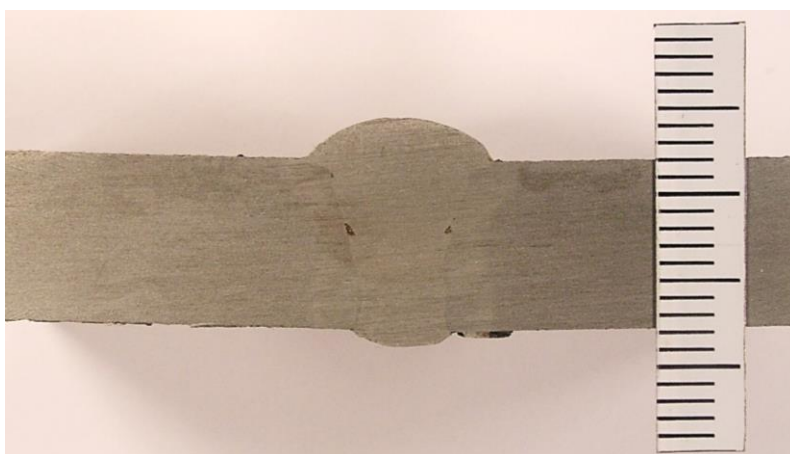
prekida ispiranjem vodom. Na slikama 40 do 43 prikazani su pojedinačni uzorci nakon nagrivanja. U tom stanju se jasno vidi metal zavara i ZUT.



**Slika 40. Uzorak 1 nakon nagrivanja**

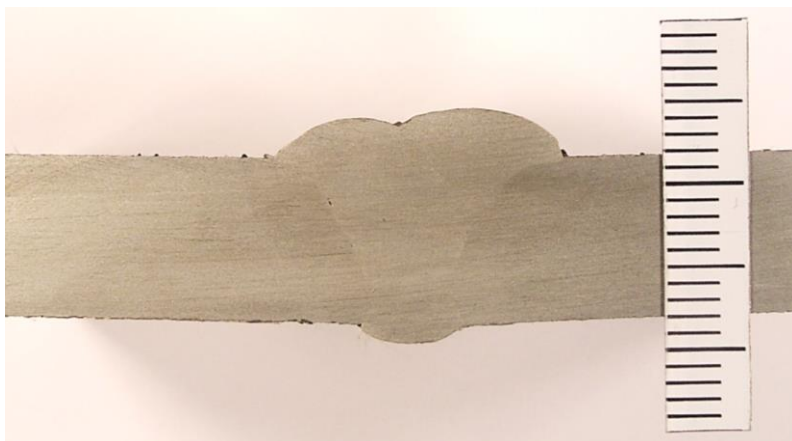


**Slika 41. Uzorak 2 nakon nagrivanja**



**Slika 42. Uzorak 3 nakon nagrivanja**





**Slika 43. Uzorak 4 nakon nagrivanja**

Uz nekoliko metoda mjerenja, zbog veće točnosti, rezultati izmjerene deformacije dane su u tablici 4. Ove vrijednosti su dobivene preko AutoCAD-a kotiranjem crteža uz pomoć izmjerenih vrijednosti na pločama. Mjerenje je izvršeno u više nasumičnih točaka uzorka, gdje je uzeta prosječna vrijednost.

**Tablica 4. Izmjerene kutne deformacije**

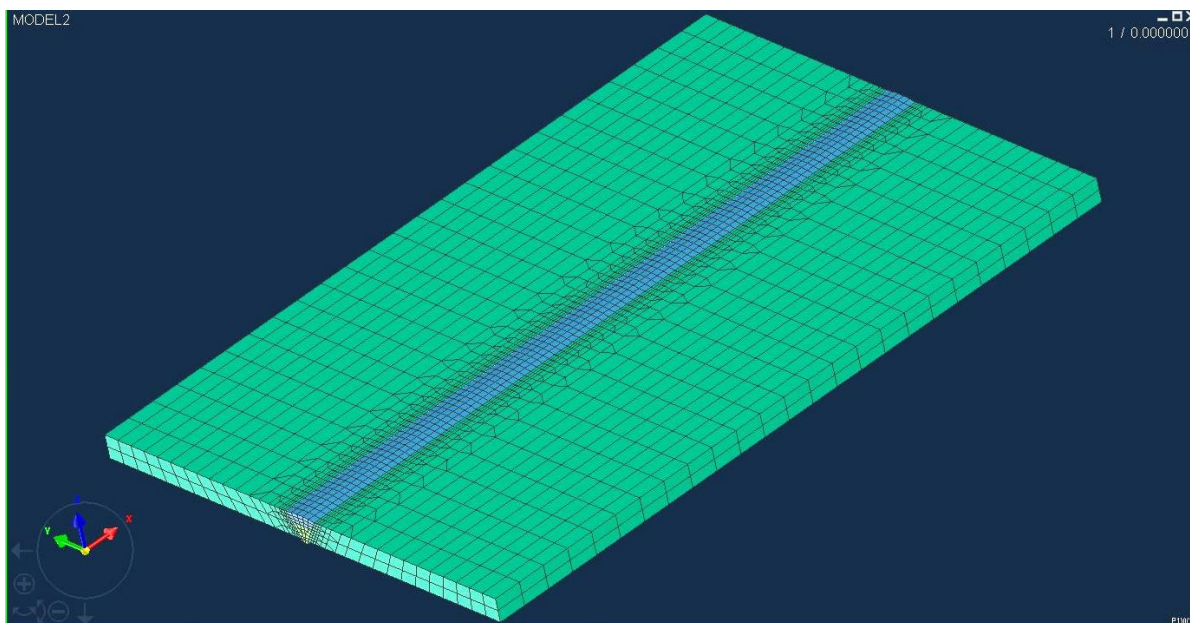
Uzorak	Kut pripreme, $\beta$ [°]	Unos topline, $Q$ [kJ/cm]	Broj prolaza	Kutna deformacija, $\alpha$ [°]
Ploča 1	40°	16	2	2,06°
Ploča 2	60°	16	2	1,8°
Ploča 3	40°	9	3	1,97°
Ploča 4	60°	9	4	3,12°

## 6.8. Simulacija u Visual Weld-u

ESI Group razvila je softver za simulaciju Visual-Environment. Od sveukupnog paketa softvera korišteni su moduli Visual-Mesh, Visual-Weld i Visual-Viewer.

Kako bi se simulacija mogla provesti, prvo je potrebno izraditi model zavarenog spoja/dijela. Stoga se unutar okruženja Visual-Environment-a odabire modul Visual-Mesh u kojem se kreira mreža 3D elemenata (sučeljeni spoj u ovom slučaju) na način da su mjesta koja su bliže samom zavaru predstavljena manjim konačnim elementima (zbog veće preciznosti rezultata), a ona

udaljenija od metala zavara su predstavljena većim, kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za izvođenje simulacije. Na slici 44 prikazan je model sa svim potrebnim elementima.



**Slika 44. Pripremljen model 2 za simuliranje**

Konačne dimenzije ploča su 10 mm x 298 mm x 98 mm sa zazorom od 3 mm što daje model veličine 10 mm x 298 mm x 201 mm. Za materijal ploča i metale zavara odabran je nelegirani konstrukcijski čelik S355JRG2.

Prije pokretanja simulacije potrebno je definirati tzv. kolektore, koji predstavljaju virtualne dijelove u simulaciji. Kolektori su osnovni materijal (ploče) (\_COMPO), metal zavara (svaki prolaz zasebno) (\_WIRE), površina za hlađenje pri svakom prolazu (\_SKIN), način stezanja ploča (Clamping) (\_CLAMP), područje djelovanja virtualnog modela unosa topline (\_LOAD) i trajektorija zavarivanja (\_PATH). Ključne riječi (\_FUNKCIJA) su vrlo važne jer se njima automatski vežu prolazi s uvjetima za određeni prolaz.

Metal zavara i ZUT s makroizbruska je početna točka za kalibraciju modela izvora topline. Cilj kalibracije je dobiti identični, ili što bliži, model rastaljenog materijala u simulaciji. Prvi korak je ispravan odabir kolektora (\_LOAD) na koji će se modelirani izvor unosa topline direktno primjenjivati, a na ostatak materijala se toplina prenosi kondukcijom.

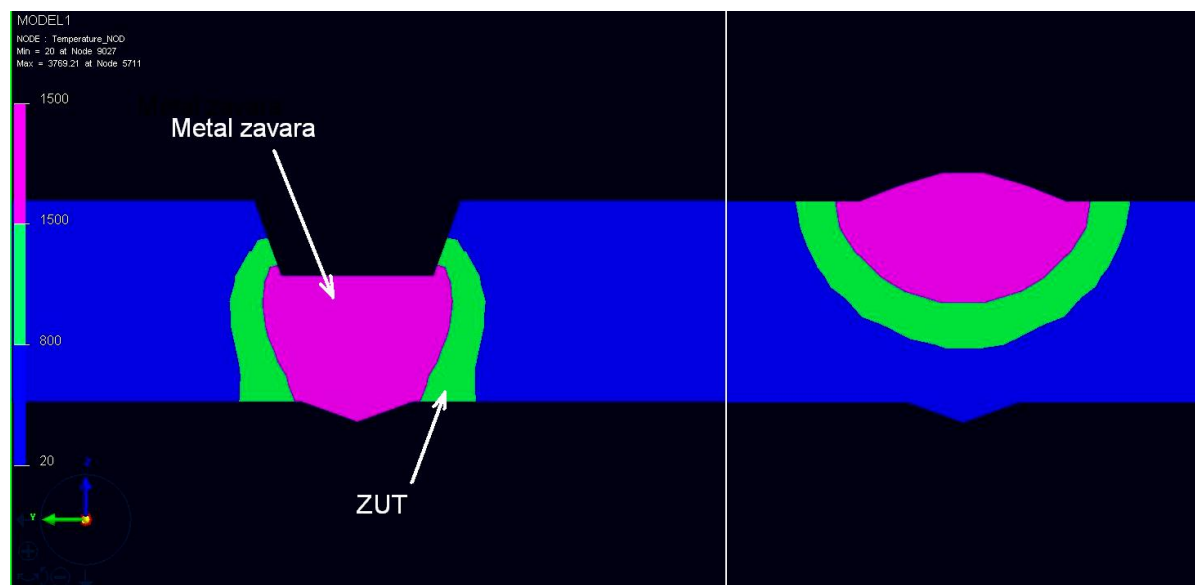
Parametri koji se unose za simulaciju su:

- postupak zavarivanja (MAG)
- brzina zavarivanja
- početno i krajnje vrijeme za svaki prolaz
- duljina, širina i visina (penetracija) modela izvora topline
- unos topline po jediničnoj duljini (u ovom slučaju kJ/cm)
- faktor iskoristivosti tehnologije (za MAG postupak je 0,8)
- uvjeti hlađenja (uzima se oplošje cijelog modela)
- uvjeti stezanja (bez stezanja).

Nakon unesenih parametara pokreće se simulacija gdje nam je potrebna toplinska i mehanička analiza rezultata. Naprezanja nisu uzeta u obzir ovog rada, pošto se na stvarnim modelima nije mjerilo zaostalo naprezanje već samo krajnje deformacije. Čekanje između prolaza određeno je na dvije minute kao i kod eksperimenta. Kod svake toplinske analize odabrana su tri temperaturna polja ( $1500 - 800 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zbog lakšeg pregleda i jasnijeg predstavljanja rezultata.  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  odgovara temperaturi taljenja čelika što je cilj zavarivanja,  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  odgovara temperaturi ZUT-a i  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  je krajnja i okolna temperatura prilikom mjerenja deformacija. Preciznost odabira skale ima veliku ulogu kod interpretacije rezultata (veličina taline i ZUT-a). Ove temperature ne mogu biti strogo određene jer materijali nisu u potpunosti homogenih svojstava kao što su u simulaciji.

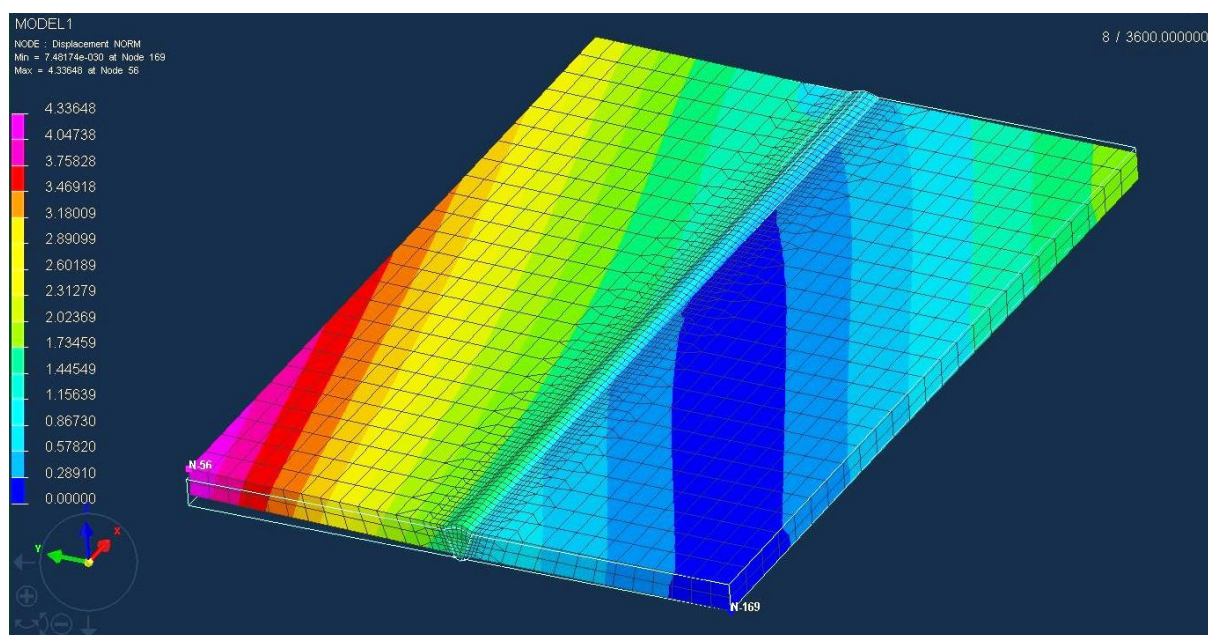
#### **6.8.1. Uzorak 1**

Uzorak 1 je sučeljeni spoj sa pripremom od  $40^{\circ}$ , dva prolaza i unosa topline  $Q = 16\text{ kJ/cm}$ . Kalibracija unosa topline prikazana je na slici 45 za svaki prolaz zasebno. Slike otprilike odgovaraju makroizbrusku što je i cilj. Preciznost rezultata simulacije ovisi o ovom parametru tako da ga je potrebno što bolje namjestiti. ZUT (zeleno područje) je malo veći nego kod pravog uzorka što se može pripisati osjetljivosti simulacije i odabiru temperaturne skale.



**Slika 45. Kalibracija unosa topline za uzorak 1**

Nakon kalibracije slijedi mehanička analiza. Na slici 46 prikazan je uzorak 1 u končanom vremenu simulacije koji iznosi 3600 sekundi (sat vremena). To vrijeme je uzeto proizvoljno kada smo sigurni da temperatura uzorka približna sobnoj temperaturi.

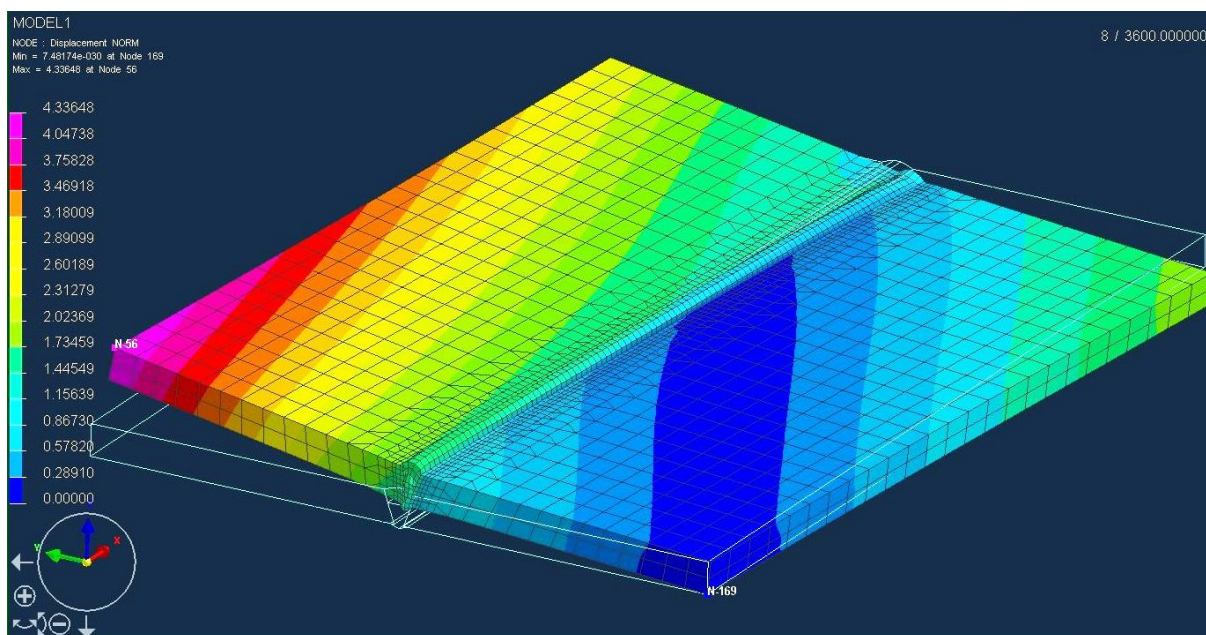


**Slika 46. Mehanička analiza uzorka 1**

Uz model prikazana je skala deformacija u milimetrima. Minimalna deformacija je naravno u točki stezanja koja iznosi nula, prikazan čvor N-169. Cijelo plavo područje na modelu prikazuje nultu deformaciju, dok cijeli spektar boje dolazi do maksimalne deformacije u čvoru N-56 u

iznosu od 4,33 mm. Prikazivanje i obrada deformacija samo u smjeru Z-osi ne bi bila realna zbog toga što se radni uzorak deformira u prostoru koordinatnog sustava X-Y-Z, a ne samo u jednom smjeru. Rezultati tada odstupaju 5 %, tj. analiza u Z-osi daje rezultat najveće deformacije u iznosi od 4,18 mm.

Na slici 47 prikazana je uvećana deformacija (za 10 puta) uzorka 1 iz razloga da se jasnije vidi prostorna deformacija.

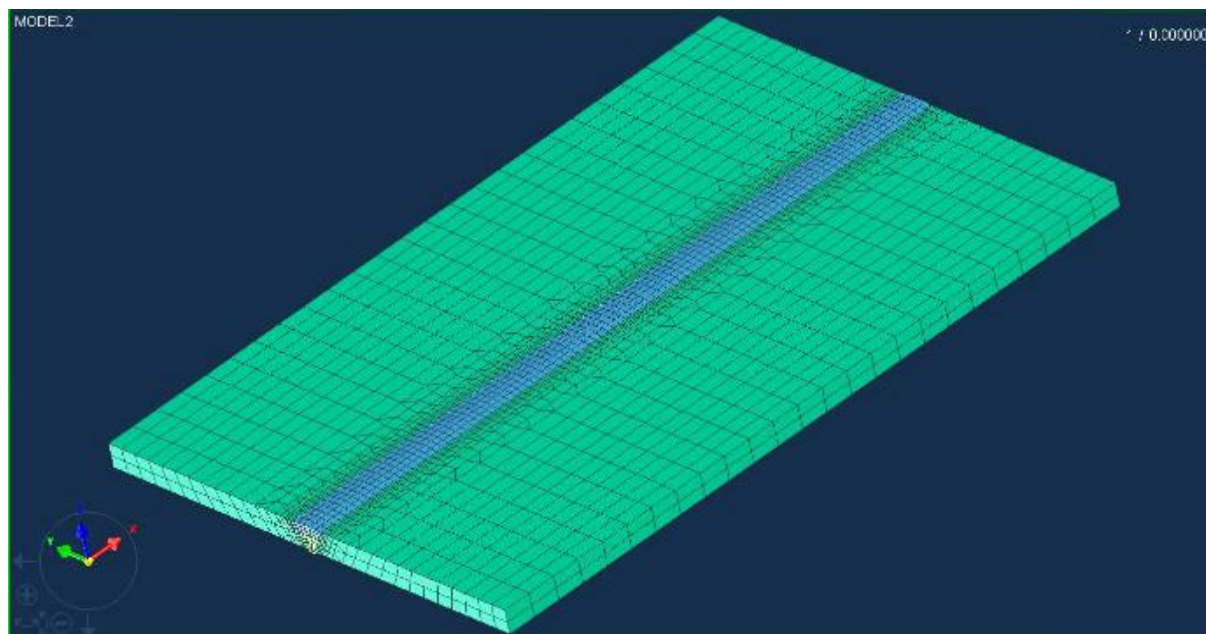


**Slika 47. Uvećana deformacija uzorka 1 za 10 puta**

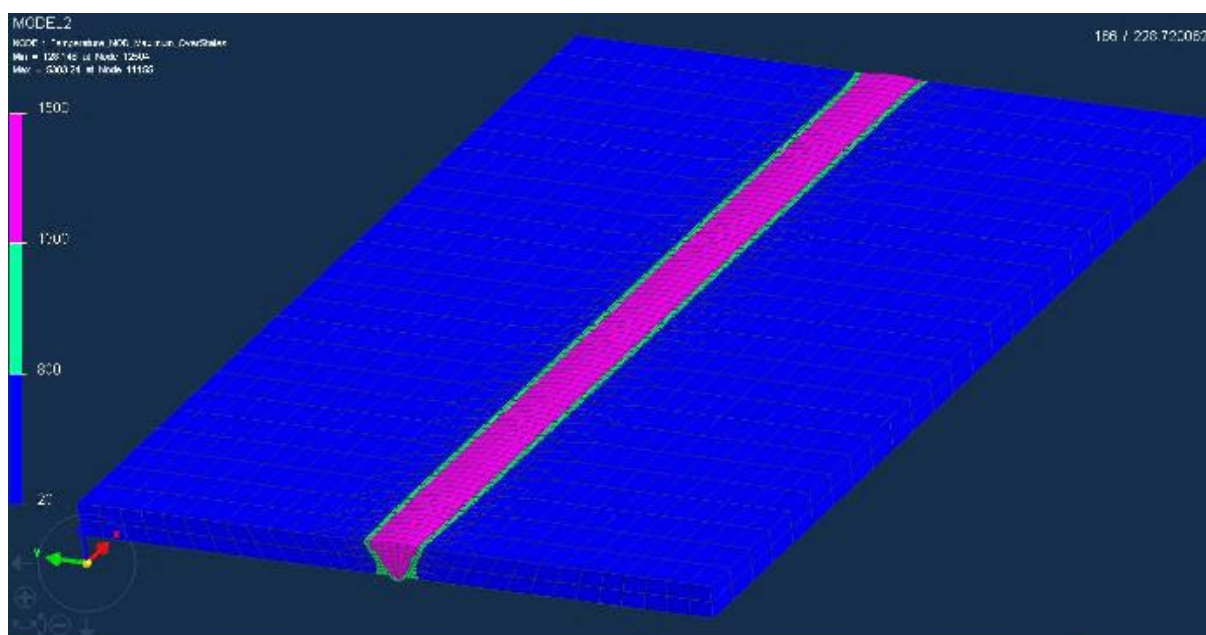
### 6.8.2. Uzorak 2

Uzorak 2 je sučeljeni spoj sa pripremom od 60°, dva prolaza i unosa topline  $Q = 16 \text{ kJ/cm}$ . Na slici 47 prikazan je uzorak 2 prije provođenja simulacije zavarivanja. Slika 49 prikazuje uzorak 2 nakon provedene simulacije zavarivanja gdje se vidi simuliran metal zavara (temperatura tog područja je 1500 °C).



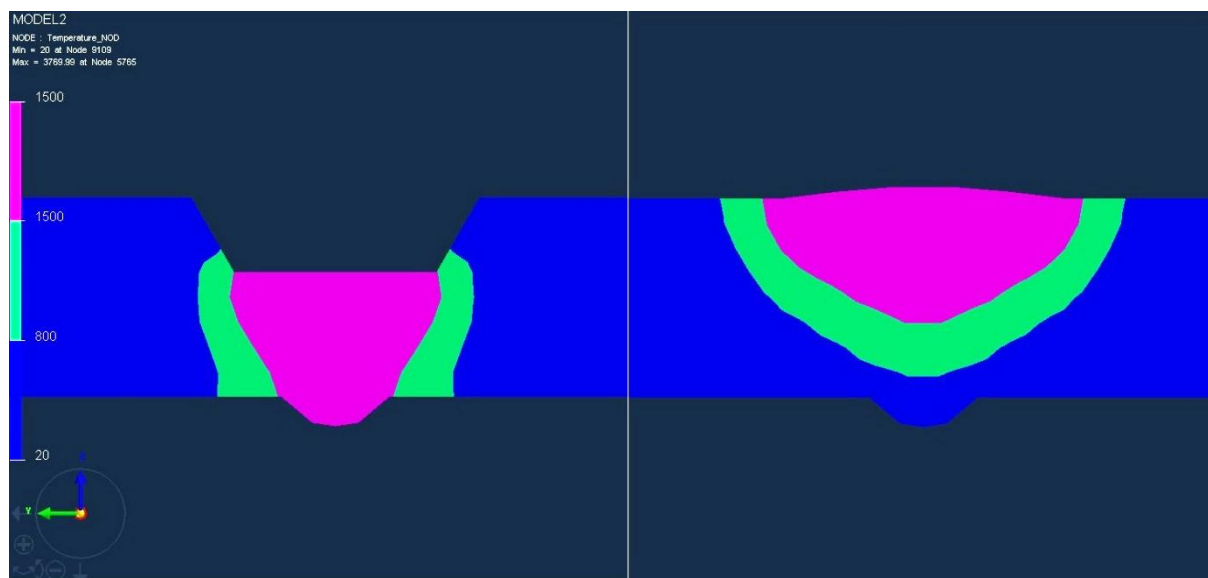


**Slika 48. Uzorak 2 prije simulacije zavarivanja**



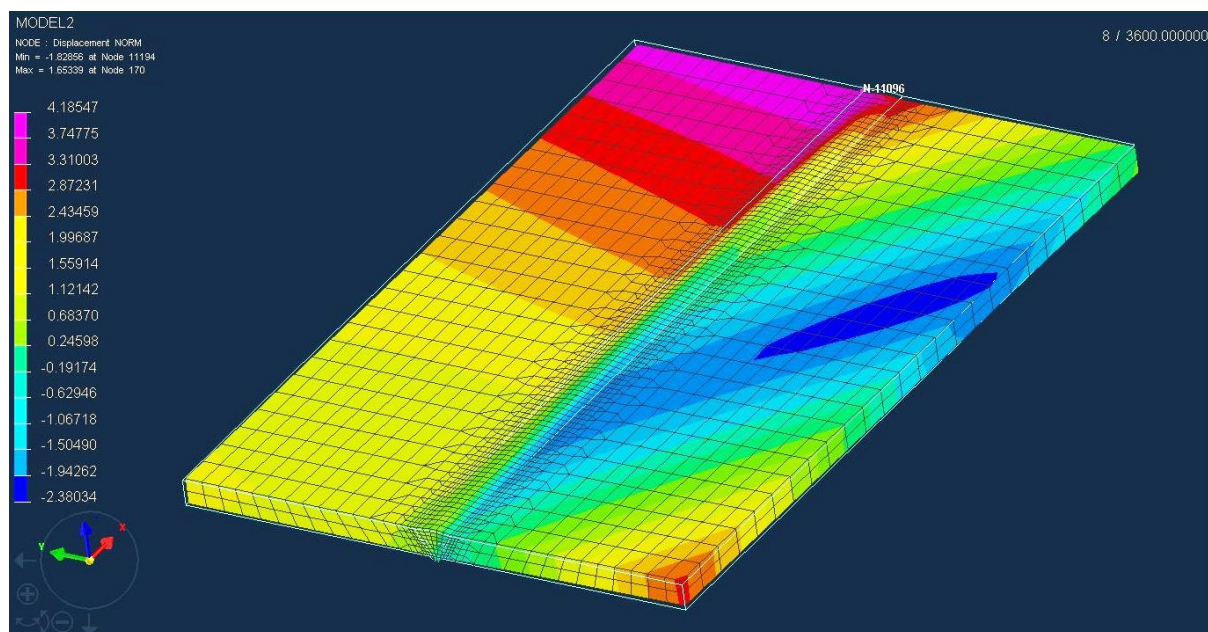
**Slika 49. Uzorak 2 nakon simulacije zavarivanja**

Širina ZUT-a odgovara stvarnom stanju što bi značilo da je kalibracija unosa topline ispravno napravljena. Kalibracija unosa topline prikazana je na slici 50.



**Slika 50. Kalibracija unosa topline za uzorak 2**

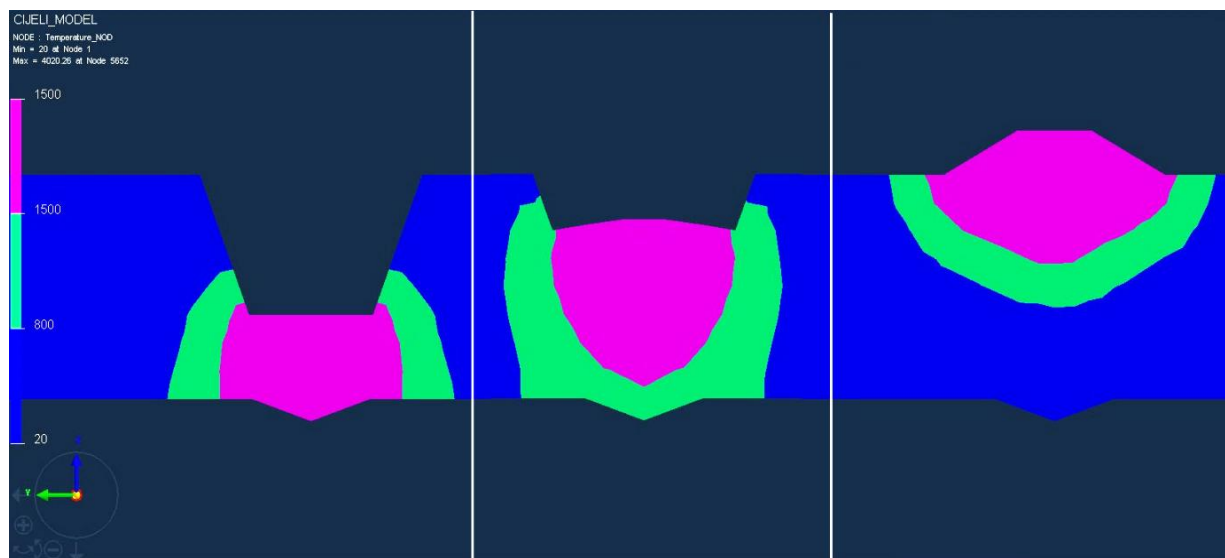
Slika 51 prikazuje konačne deformacije nakon punog vremena (sat vremena). Maksimalna deformacija iznosi 1,65 mm u čvoru N-170, a minimalna deformacija iznosi - 1,82. ukupna razlika iznosi 3,47 mm. Deformacija je manja od predviđene, unatoč većem volumenu taline naspram uzorka 1. Glavni razlog odstupanja rezultata bit će objašnjen u zaključku.



**Slika 51. Mehanička analiza uzorka 2**

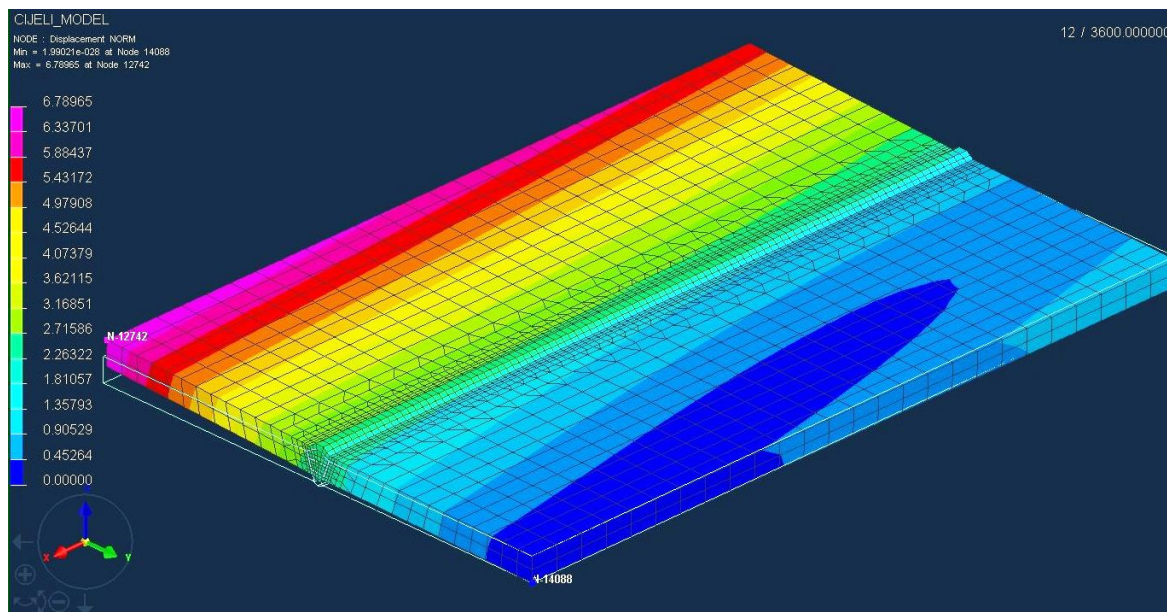
### 6.8.3. Uzorak 3

Uzorak 3 je sučeljeni spoj sa pripremom od  $40^\circ$ , tri prolaza sa unosom topline  $Q = 9 \text{ kJ/cm}$ . Na slici 52 prikazana je kalibracija unosa topline za sva tri prolaza. Kod kalibracije drugog prolaza javio se veliki ZUT, veći nego kod makroizbruska.



**Slika 52. Kalibracija unosa topline za uzorak 3**

Slika 53 prikazuje konačne deformacije uzorka 3. Minimalna deformacija je u čvoru N-14088 gdje je i model učvršćen, dok je maksimalna deformacija u čvoru N-12742 u iznosu od 6,79 mm. Ovaj model ima odstupanje 0,79 mm od stvarne izmjerene deformacije uzorka 3.

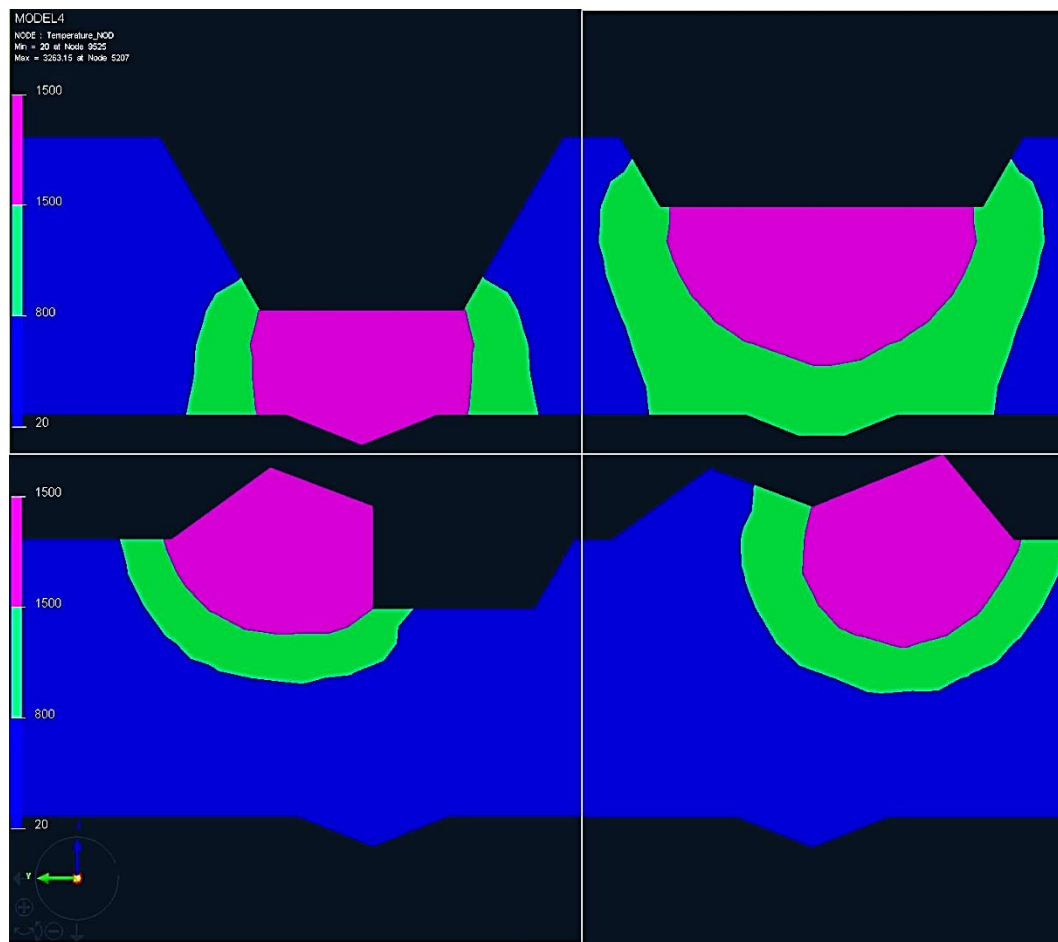


Slika 53. Mehanička analiza uzorka 3

#### 6.8.4. Uzorak 4

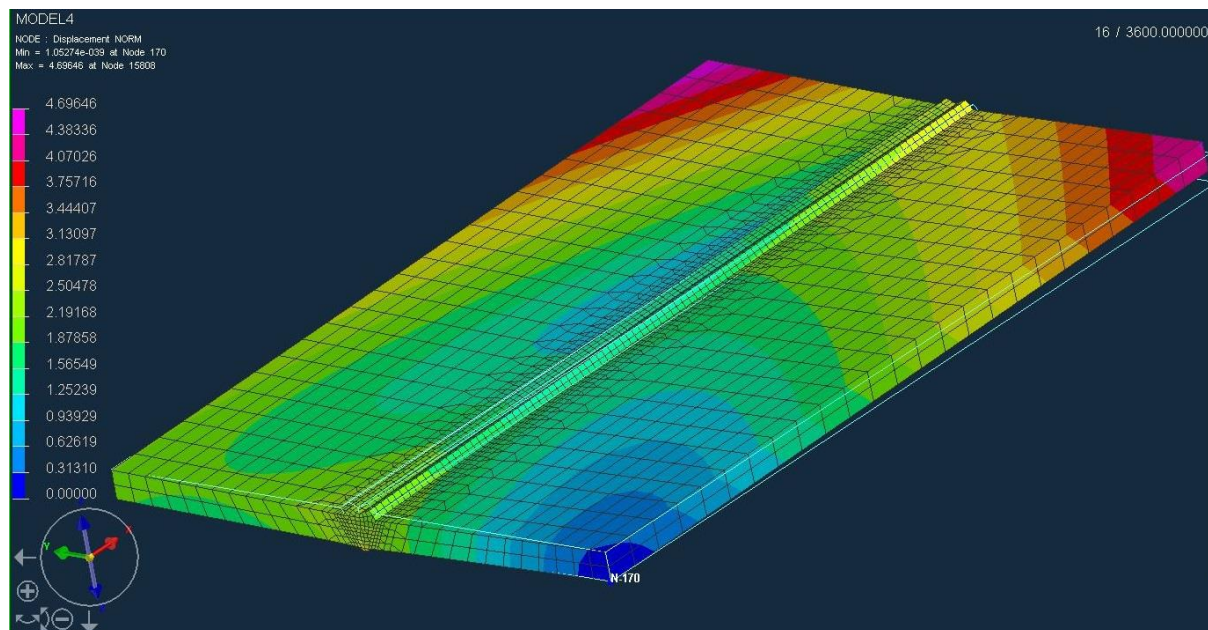
Uzorak 4 je sučeljeni spoj sa pripremom od  $60^\circ$ , četiri prolaza i unos topline  $Q = 9 \text{ kJ/cm}$ . Plan pokusa bio je sa tri prolaza, ali ovi parametri zavarivanja su granični. Depozit dodatnog materijala i unos topline su preniski da bi se ispunio pripremljeni otvor od  $60^\circ$  u tri prolaza. Iz tog razloga je dodan još jedan prolaz za popunu. Trajektorije trećeg i četvrtog prolaza su simetrično zamaknute u odnosu na vertikalnu os zavarenog spoja. Kod nedovoljne širine depozita dodatnog materijala povećava se napon električnog luka, ali taj parametar ima svoje ograničenje. Na drugom prolazu napon je bio maksimalne vrijednosti, uz konstantni unos topline, kako bi se zahvatile obje površine i izbjeglo naljepljivanje. Kalibracija izvora topline za sva četiri prolaza prikazan je na slici 54. Model je napravljen sa manje točaka čime se gubi realistična zakrivljenost lica i korijen zavora. Metal zavora koji se nalazi iznad ravnine gornje površine ima zanemarivo mali utjecaj na krajnje rezultate. Stvaranjem pravilne krivulje produljuje se vrijeme simulacije i kompleksnost geometrije.





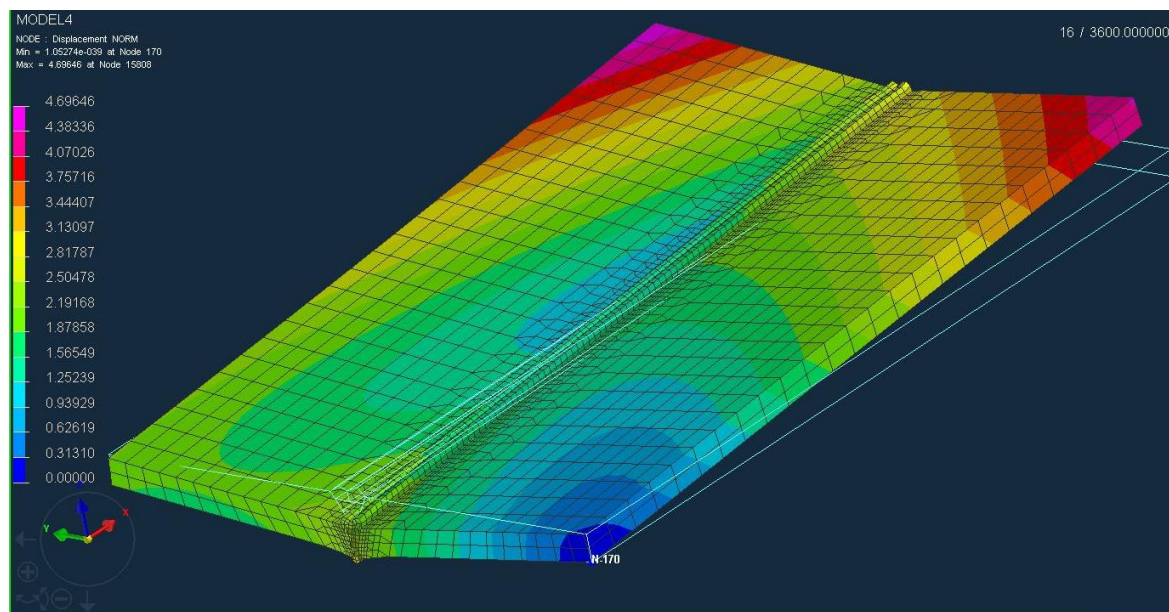
**Slika 54. Kalibracija unosa topline za uzorak 4**

Slika 55 prikazuje konačne deformacije uzorka 4. Minimalna deformacija je u čvoru N-170 gdje je i model učvršćen, a maksimalna deformacija u vrijednosti od 4,69 mm nalazi se u čvoru N-15808 (stražnja strana gornjeg lijevog kuta modela koji je prikazan na slici 54). Odstupanje od mjerenja realnog uzorka 4 je 0,31 mm, što je prihvatljivo. Od očekivanja da će ovaj uzorak biti najviše deformiran zbog najvećeg broja prolaza, manje je deformiran od uzorka 3 zbog rasporeda i pozicije pojedinog zavora. Deformacije bi bile veće u slučaju da su zadnja dva prolaza jedna iznad drugog, ali u ovom slučaju to nije bilo moguće izvesti jer s danim parametrima zavarivanja ne bi bilo moguće u potpunosti ispuniti žlijeb.



**Slika 55. Mehanička analiza uzorka 4**

Na slici 56 prikazana je uvećana deformacija za 10 puta.



**Slika 56. Deformacija uzorka 4 uvećana za 10 puta**

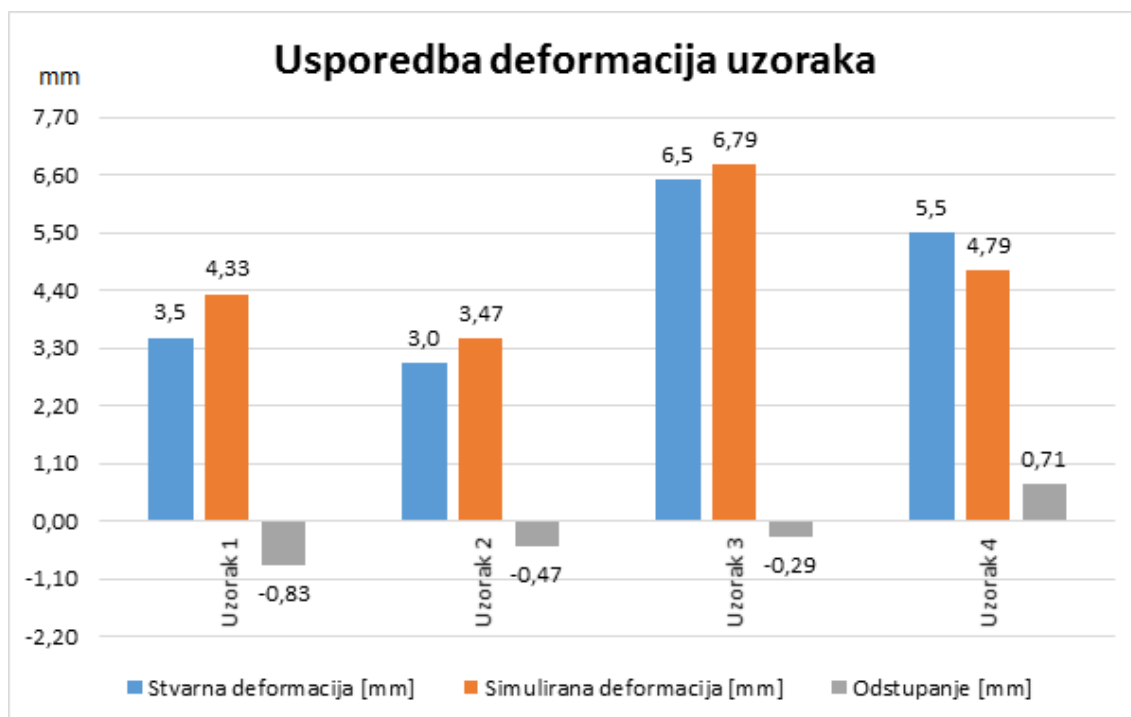
## 6.9. Analiza rezultata

U svim materijalima javljaju se naprezanja, izazvana vanjskom silom ili unutarnjom silom nastalom mehaničkom ili toplinskom obradom. Procesom zavarivanja u materijal se unose neželjena toplinska naprezanja čime se uzrokuju deformacije. To se događa zbog unosa energije u materijal, taljenja i solidifikacije metala. U okruženju zavarenog spoja tijekom solidifikacije zavora javljaju se vlačna zaostala naprezanja, posebice u longitudinalnom pravcu. Ta naprezanja utječu na dinamičku čvrstoću i žilavost, posebice ako postoje određena zarezna djelovanja ili nesavršenosti u području zavora. Nakon zavarivanja zaostala vlačna naprezanja ostaju u središtu zavora i uzrokuju balansiranje tlačnih naprezanja van zone zavarivanja.

Visual-Weld interpretira unos topline na pojednosvljeni način. Kalibracijom izvora topline izbjegava se potreba za definiranjem oblika električnog luka, zaštitnog plina, načina prijenosa metala, slobodnog kraja žice, nagiba pištolja i samim time tehniku zavarivanja (lijevu, neutralnu ili desnu). Ono što je također bitno naglasiti je to da se u programu ne simulira ono što se događa u električnom luku već samo u materijalu.

Prije samog početka izvođenja eksperimenta pretpostavka je bila da će se najviše deformirati uzorak 4 zbog velikog kuta pripreme i velike količine taline. Naime, tijekom zavarivanja uočen je problem s nedostatnim unosom topline i nedovoljnim depozitom dodatnog materijala. Promjenom redoslijeda zavarivanja riješio se taj problem.

Prije komentiranja i usporedbe rezultata eksperimentalnog dijela potrebno je napomenuti bitnu razliku stvarnog procesa i simulacija. Softveri imaju kreirano idealno okruženje, idealne homogene materijale s točno određenim svojstvima u svakom infinitesimalno malom dijelu materijalu (elementu). Takvi se uvjeti pokušavaju realizirati u virtualnim procesima, ali zbog stvarnih raznoraznih nesavršenosti materijala, procesa i uređenosti okoline, to nije u potpunosti moguće realizirati. Ploče koje su se koristile u ovom radu nisu idealne geometrije i dimenzija i ne može se garantirati da su predhodno bile bez ikakvih zaostalih naprezanja. To naravno utječe na krajnje rezultate što se i vidi u usporedbi.



**Slika 57. Usporedba deformacija uzoraka**

Slika 57 prikazuje rezultate i usporedbe mjerenja karakteristične mjere. Sva mjerna odstupanja su u granicama od 1 mm. U slučaju većeg odstupanja eksperiment bi se trebao ponavljati i pokušati utvrditi grešku velikog odstupanja.

Simulirana deformacija uzorka 1 je veća od izmjerene na uzorku. Odstupanje je relativno veliko od 0,83 mm (19%) i u stvarnim konstrukcijama to ne bi bilo prihvatljivo jer postoji preveliki rizik pojave škarta. Osim same greške u mjerenju kalibracija unosa topline treba još nekoliko iteracija za preciznije rezultate.

Za uzorak 2 bi se očekivala veća deformacija od simulirane i izmjerene, a ona je najmanja.

Najveću deformaciju pokazuje uzorak 3 te se izmjerena deformacija poklapa sa simuliranom, uz minimalno odstupanje. Kod ovog uzorka je kalibracija napravljena gotovo idealno što i dokazuju rezultati mjerenja.

Uzorak 4 ima odstupanja pretežno zbog stvarne kompliciranije geometrije i većeg broja prolaza. U slučaju većeg broja prolaza povećava se kompleksnost simulacije i veća je mogućnost pojave pogreške.



## 7. ZAKLJUČAK

Iz potpunog eksperimentalnog dijela zavarivanja u Laboratoriju i virtualnim zavarivanjem može se zaključiti:

- Mjerni rezultati stvarnih uzoraka i simuliranih uzoraka razlikuju se unutar jednog milimetra, čime simulacija točno predviđa deformacije. Kod složenijih konstrukcija teško je predvidjeti kako će zavari utjecati na tu konačnu konstrukciju sve dok se ne ohladi na okolnu temperaturu. Tada su vidljive i mjerljive deformacije koje mogu biti izvan zadanih tolerancija. Kod takvih situacija Visual-Weld (i drugi alati za simulacije zavarivanja) pokazuje svoje prednosti nasuprot izrade protutipova koji služe kao izvor informacija.
- Model iz simulacije je jednostavniji nego stvarni model u pogledu uvijeta hlađenja i pričvršćenja, unutarnjih naprezanja kod proizvodnje sastavnih dijelova i nesavršenosti mikrostrukture i kristalni rešetki. U simulaciji su postavljeni idealni uvjeti na način da se hlađenje vrši sa kompletnom površinom modela koja je u doticaju sa okolnim zrakom sobne temperature. Stvarni se uzorak ne može hladiti na taj način jer se proces zavarivanja fizički ne može provesti u prostoru bez ikakvog kontakta uzorka i stola za zavarivanje. Jedan se dio hladio sa zrakom, dok se preostali dio topline prenosio na podlogu na kojoj se nalazio uzorak tijekom zavarivanja (vidljivo na slici 33).
- Pripoji se ne simuliraju, a imaju veliki utjecaj na naprezanja i deformacije. Pripoj na kraju trajektorije sprečava razmicanje i skupljanje ploča. Kod simulacije uzorak se deformira slobodno u svim smjerovima koordinatnog sustava.
- Keramička podloška kod zavarivanja sprečava gubitak taline tijekom procesa. U simulaciji nema dodavanja podloške, nego se izrađuje model konačnog oblika metala zavara za svaki prolaz. Keramika ima određenu toplinsku vodljivost koja se svakako manja od samog okolnog zraka. Malim intenzitetom odvođenja topline od taline podloška se ponaša kao izolator.
- Visual-Weld je vrlo primjelnjiv za ovo područje znanosti uz vrlo detaljnu analizu.

## 8. LITERATURA

- [1] Kromm A, Dixneit J, Kannengiesser T, »Residual Stress Engineering by Low Transformation Temperature Alloys,« p. 1.
- [2] Alfiredić I, Nauka o čvrstoći I., Zagreb: Tehnička knjima Zagreb, 1989.
- [3] Frgić L; Hudec M, Mehanika kontiiuma, Zagreb: RGN, 2006.
- [4] Pustačić D; Cukor I, Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [5] Pilipenko A, Computer simulation of residual stress and distortion, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [6] Ćorić D; Alar Ž, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svjstava materijala (interna skripta), Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014./2015..
- [7] Colegrove P; Ikeagu C; Thistlethwaite A; Williams S; Nagy T; Suder W; Steuwer A; Pirling T, »The welding process impact on residual stress and distortion,« svez. 14 (8), pp. 717-725, 2009.
- [8] Bauer B, Zaostala naprezanja i deformacije - postupci spajanja (predavanja), Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [9] Šisl V; Kovačević B, Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio), Zagreb: Zavarivanje 44 (1/2), 2001.
- [10] Perić M, Numeričko modeliranje zaostalih naprezanja i pukotina u zavarenim konstrukcijama, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [11] Lukačević Z, Zavarivanje, Slavonski Brod: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1998.
- [12] Samardžić I, Analiza tehologičnosti zavarenih konstrukcija - digitalni udžbenik, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [13] Grong, Metallurgical Modelling of welding, London, 1997.
- [14] Kandil FA; Lord JD; Fry AT; Grand PV, A Review of Residual Stress Measurement Methods, Teddington: NPL Materials Centre, 2001.
- [15] Rossini NS, Dassisti M, Benyounis KY, Olabi AG, »Methods of measuring residual stresses in components,« *Materials and Design*, p. 574, 2012.

- 
- [16] Šarga, P. , František M., »Comparison of Ring-Core Method and Hole-drilling Method Used for Determining Residual Stresses,« *American Journal of Mechanical Engineering*, 2013, Vol. 1, 2013.
- [17] SWANTech SORPAS 3D, <https://www.swantec.com/products/sorpas-3d/>, pristupljeno 7. 11. 2016.
- [18] Simufact Simulating Manufacturing, <http://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>, pristupljeno 7. 11. 2016.
- [19] E. Group, The Welding Simulation Solution, Paris, 2006.
- [20] E. Zagreb, Katalog dodatnog materijala, 2015.
- [21] ...., <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, pristupljeno 7. 11. 2016.
- [22] ...., <http://www.westyorkssteel.com/carbon-steel/s355/>, pristupljeno 7. 11. 2016.
- [23] ...., HRN EN ISO 9692-1 - Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja.
- [24] ...., Zavarivanje- Preporuke za zavarivanje metalnih materijala- 2. dio, 2002.